

Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica



**Diseño de un cojinete lineal para
entornos criogénicos basado en
levitación magnética pasiva**

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

AUTOR: *Víctor Castro Fernández*

TUTOR: *Efrén Díez Jiménez*

DIRECTOR: *Ignacio Valiente Blanco*

Leganés, 19 de Junio de 2013

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<i>Pág.</i>
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	11
AGRADECIMIENTOS	12
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
1. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL PROYECTO	15
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	16
1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO	16
2. INTRODUCCIÓN	18
2.1. FUNDAMENTOS DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD	19
2.1.1. Introducción al fenómeno de la superconductividad.....	19
2.1.2. Evolución histórica.....	21
2.1.3. Clasificación de los superconductores	23
2.2. ESTADO MEISSNER FRENTE A ESTADO MIXTO	26
2.2.1. Estado Meissner	26
2.2.2. Estado mixto.....	27
2.2.3. Diferencias entre ambos estados	28
2.3. APLICACIONES	30
2.3.1. Estado del arte	30
2.3.2. Futuras aplicaciones	33
2.4. COJINETES: ESTADO DEL ARTE	34
3. DISEÑO Y METODOLOGÍA	38
3.1. INTRODUCCIÓN.....	39

3.2.	DISEÑO DEL MECANISMO	40
3.3.	METODOLOGÍA UTILIZADA	43
4.	MODELOS Y RESULTADOS.....	47
4.1.	MECANISMO ORIGINAL	48
4.1.1.	Desplazamiento Z.....	48
4.1.2.	Desplazamiento Y: Fuerzas y Campo Magnético Tangencial 49	
4.1.3.	Desplazamiento X	52
4.2.	MECANISMO MEJORADO	58
4.2.1.	Desplazamiento Z.....	59
4.2.2.	Desplazamiento Y: Fuerzas y Campo Magnético Tangencial 60	
4.3.	COMPARACIÓN ENTRE AMBOS MECANISMOS	66
5.	MATERIALES SUPERCONDUCTORES	74
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	75
5.2.	YBaCuO	76
5.3.	T1-2223.....	79
6.	PRESUPUESTO.....	81
6.1.	COSTE DE ADQUISICIÓN, MONTAJE Y PRUEBA.....	82
6.1.1.	Coste de adquisición.....	82
6.1.2.	Coste de montaje y pruebas	83
6.1.3.	Coste total.....	83
6.2.	COSTE DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	84
6.2.1.	Coste del conjunto de equipo necesario.....	84
6.2.2.	Coste total.....	85
7.	CONCLUSIONES.....	86
7.1.	CONCLUSIONES.....	87
7.2.	CONCLUSIONS	88

8. REFERENCIAS.....	89
REFERENCIAS	90
ANEXOS.....	95
ANEXO A. CÁLCULO DEL CAMPO MAGNÉTICO TANGENCIAL USANDO ANSYS MAXWELL v15	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	<i>Representación de un material superconductor expuesto a campo magnético exterior</i>	18
Figura 2.2.	<i>Resistividad eléctrica de un superconductor dependiendo de la temperatura</i>	19
Figura 2.3	<i>Variación del campo magnético crítico dependiendo de la temperatura</i>	19
Figura 2.4	<i>Resultados del experimento con mercurio de Onnes en 1911</i>	20
Figura 2.5	<i>Orden cronológico del descubrimiento de materiales superconductores</i>	22
Figura 2.6	<i>Cables de Nb_3Sn</i>	23
Figura 2.7	<i>Pastillas de YBaCuO</i>	23
Figura 2.8	<i>Estados del superconductor dependiendo de su comportamiento físico</i>	24
Figura 2.9	<i>Comportamiento de un superconductor en estado Meissner</i>	25
Figura 2.10	<i>Levitación de un imán permanente sobre un superconductor</i>	26
Figura 2.11	<i>Vórtice magnéticos formados en estado superconductor mixto</i>	27
Figura 2.12	<i>Fuerza de levitación dependiendo de la altura en ambos estados superconductores</i>	28

	<u>Pág.</u>
Figura 2.13 <i>MAGLEV en Yamanashi, Japón</i>	30
Figura 2.14 <i>LHC en Ginebra, Suiza</i>	31
Figura 2.15 <i>Imagen del cerebro humano gracias a MRI</i>	32
Figura 2.16 <i>Cable con tecnología superconductora para evitar pérdidas eléctricas</i>	32
Figura 2.17 <i>Interferómetro con tecnología infrarroja</i>	33
Figura 2.18 <i>Cojinete de aire. La entrada del fluido se produce por los laterales con tal fuerza que se evita el contacto del eje</i>	34
Figura 2.19 <i>Cojinete magnético activo</i>	34
Figura 2.20 <i>Cojinete basado en SML</i>	35
<u>CAPÍTULO 3</u>	
Figura 3.1 <i>Mecanismo original (izquierda) y mecanismos mejorado (derecha) analizados</i>	38
Figura 3.2 <i>Dirección de magnetización axial del imán permanente</i>	40
Figura 3.3 <i>Vista de planta del mecanismo</i>	41
Figura 3.4 <i>Vista de perfil del mecanismo</i>	41
Figura 3.5 <i>Fuerza de levitación dependiendo del radio del imán permanente</i>	42
Figura 3.6 <i>Malla computacional en Ansys Meshing</i>	43
Figura 3.7 <i>Malla computacional en Ansys Maxwell v15</i>	44
Figura 3.8 <i>Estudio del mallado del mecanismo en Ansys Maxwell v15</i>	44

CAPÍTULO 4

	<u>Pág.</u>
Figura 4.1 <i>Sistema de referencia utilizado para el cálculo de la fuerza de levitación</i>	47
Figura 4.2 <i>Fuerza de levitación dependiendo de la altura del imán permanente</i>	48
Figura 4.3 <i>Fuerzas en los distintos ejes para desviaciones en el eje Y del imán permanente</i>	49
Figura 4.4 <i>Campo magnético tangencial dependiendo de la desviación en el eje Y del imán permanente</i>	51
Figura 4.5 <i>Ángulo de equilibrio del imán permanente respecto al superconductor</i>	52
Figura 4.6 <i>Fuerza en X para el desplazamiento axial</i>	53
Figura 4.7 <i>Fuerza de levitación para el desplazamiento axial</i>	54
Figura 4.8 <i>Par de cabeceo para el desplazamiento axial</i>	55
Figura 4.9 <i>Campo magnético tangencial para el desplazamiento axial</i>	56
Figura 4.10 <i>Campo magnético tangencial en el borde del superconductor</i>	57
Figura 4.11 <i>Mecanismo mejorado con el sistema de referencia</i>	58
Figura 4.12 <i>Fuerza de levitación con variación en la altura</i>	59
Figura 4.13 <i>Fuerzas para desviación en la dirección Y</i>	60
Figura 4.14 <i>Campo magnético tangencial dependiendo de la desviación en la dirección Y</i>	61
Figura 4.15 <i>Fuerza X para desplazamiento en dirección X</i>	62

	<u>Pág.</u>
Figura 4.16 <i>Fuerza de levitación para desplazamiento en eje X</i>	63
Figura 4.17 <i>Par de cabeceo para el desplazamiento en eje X</i>	64
Figura 4.18 <i>Campo magnético tangencial para el desplazamiento en el eje X</i>	65
Figura 4.19 <i>Fuerzas vectoriales que actúan sobre el imán permanente</i>	66
Figura 4.20 <i>Campo magnético tangencial para el mecanismo original (izquierda) y mecanismo mejorado (derecha)</i>	67
Figura 4.21 <i>Contribución de la cara lateral externa del superconductor</i>	69
Figura 4.22 <i>Variaciones del par de cabeceo en el mecanismo original al final de carrera debido al borde recto</i>	71
Figura 4.23 <i>Fuerzas que actúan sobre el imán al final de carrera para el mecanismo original (izquierda) y mecanismo mejorado (derecha)</i>	72
 <u>CAPÍTULO 5</u>	
Figura 5.1 <i>Criostato esférico utilizado en la industria</i>	74
Figura 5.2 <i>Estructura cristalina del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$</i>	75
Figura 5.3 <i>Temperatura crítica del YBaCuO dependiendo de la cantidad de oxígeno que presente</i>	76
Figura 5.4 <i>Campo magnético tangencial en función de la temperatura crítica para dos composiciones distintas de YBaCuO</i>	77
Figura 5.5 <i>Estructura cristalina del $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$</i>	78

Figura 5.6	<i>Campo magnético tangencial en función de la temperatura crítica para el T1-2223</i>	79
-------------------	--	----

ANEXOS

Figura AA.1	<i>Localización de “Calculator”</i>	95
--------------------	-------------------------------------	----

Figura AA.2	<i>Ventana de diálogo de “Calculator”</i>	97
--------------------	---	----

Figura AA.3	<i>Representación de las expresiones obtenidas con “Calculator”</i>	99
--------------------	---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1	<i>Coste de materiales empleados en el proyecto</i>	81
Tabla 6.2	<i>Coste de equipo de seguridad necesario para trabajar en el laboratorio</i>	82
Tabla 6.3	<i>Coste total de personal responsable de la ejecución del proyecto</i>	82
Tabla 6.4	<i>Coste del equipo informático utilizado en el proyecto</i>	83
Tabla 6.5	<i>Coste de licencias de software utilizado</i>	83

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi tutor Efrén toda la ayuda que me ha prestado durante el proyecto, así como los conocimientos e ideas que he conseguido adquirir gracias a sus consejos, que me servían para guiar el proyecto y poder enfocarlo de la mejor manera posible. Además también por su dedicación y predisposición para quedar en cualquier momento para resolver dudas clave para la continuación del proyecto.

También me gustaría mencionar especialmente al director de este proyecto, Ignacio Valiente, la persona que me introdujo en todo el mundo de la superconductividad y que hizo que, desde el principio, empezara a interesarme por este campo. Gracias a su enfoque práctico pude entender rápido las ideas básicas de la superconductividad, así como ver en el laboratorio el funcionamiento real. Por ello y más cosas, no podía faltar mencionarle.

Después están los de siempre, los que han estado día tras día conmigo desde que empecé la carrera. Todos los buenos amigos que he hecho durante estos cuatro años y con los cuales he vivido, y espero que no acaben, momentos inolvidables tanto dentro como fuera de la universidad. Desde los peores momentos, como días enteros de prácticas o estudio en la universidad, hasta los mejores, como los viajes o escapadas de un día que ellos han hecho que hayan sido simplemente perfectos. Ellos saben de sobra quiénes son, por lo que no es necesario que nombre a nadie.

Por último no podía faltar el agradecimiento a mi hermano. Él ha sido el que me ha guiado por el buen camino durante estos años, a veces con ideas que no compartía en un principio pero que, al final, muchas veces él tenía la razón. Y, sobre todo, desde hace dos años, que aunque no haya estado físicamente al lado, siempre ha estado apoyándome y dándome consejos perdiendo parte de su tiempo para intentar ayudarme a elegir la mejor opción para mi futuro. Por todo ello, gracias Raúl.

RESUMEN

El sistema magnético compuesto por el superconductor y el imán permanente se encuentra en un entorno criogénico, esencial para poder conseguir el **efecto Meissner**. El imán permanente produce un campo magnético, donde cierta parte de este campo es absorbido por el superconductor, que hace posible que éste se encuentre en estado Meissner siempre y cuando no se supere un cierto límite. Tal efecto provoca que el superconductor expulse el campo magnético de su interior generando un conjunto de fuerzas que hacen posible la **levitación del imán permanente**.

Tanto las fuerzas como el par generado se estudian en diversas posiciones del imán permanente para observar sobre qué rango longitudinal o axial de superconductor es posible trabajar sin superar el límite del estado Meissner. Además se estudia si tales fuerzas, que varían dependiendo de la posición relativa en que se encuentre el imán permanente levitando sobre el superconductor, contribuyen a la **estabilización** de dicho imán en todas las direcciones: vertical, radial y axial o longitudinal.

A partir del texto a continuación se ha extraído un artículo que a fecha de defensa del presente proyecto ha sido aceptado para discusión en la 5ª edición del Congreso Internacional de Tribología que se celebrará en Turín (Italia).

Palabras clave: *superconductor, imán, criogenia, Meissner, levitación*

ABSTRACT

The magnetic system formed by a permanent magnet and a superconductor is placed in a cryogenic environment, essential to achieve the **Meissner state**. The permanent magnet produces a magnetic field where, a certain part of this field is absorbed by the superconductor, and it makes possible to get the Meissner state as long as that magnetic field does not overpass a limiting value. Such effect induces the expulsion of the magnetic field from the interior of the superconductor generating a set of forces that are able to **levitate the permanent magnet** over the superconductor.

Both the forces and the torque generated are studied in many different positions of the permanent magnet to observe over which projected area of the superconductor is possible to work without losing the Meissner state. Moreover, those forces, which vary depending on the relative position of the permanent magnet levitating over the superconductor, are studied in order to know which ones contribute to the **stabilization of the permanent magnet** in all directions: vertical, radial and axial or longitudinal.

From this text, an article has been extracted and it has been accepted for discussion in the 5th edition of World Tribology Congress, which will be held in Torino (Italy).

Key words: *superconductor, permanent magnet, cryogenics, Meissner, levitation*

1. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA **DEL PROYECTO**

1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es la comprensión del comportamiento mecánico de un sistema magnético formado por un superconductor y un imán permanente en un entorno criogénico.

Concretamente, este sistema se va a analizar para la aplicación de un **cojinete lineal** donde el superconductor se encuentra en estado Meissner. Una de las principales ventajas es la **ausencia de contacto** entre ambas partes, por lo que las pérdidas energéticas frente a sistemas convencionales se ven notablemente reducidas. Esto implica también que no hay fatiga por contacto entre los componentes, lo que conlleva una **disminución en el mantenimiento del sistema**.

En cuanto a los componentes empleados, se dan varias alternativas tanto de materiales como de formas mejoradas que se pueden utilizar en el superconductor para asegurar el estado Meissner durante todo su funcionamiento.

1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El presente proyecto se ha dividido en 8 capítulos y un anexo para poder explicar con la mayor claridad posible el proyecto que se expone.

En este primer capítulo se expone tanto los objetivos principales que se quieren alcanzar con este proyecto así como la estructura que se seguirá durante toda la memoria.

En el segundo capítulo hay una introducción a la superconductividad así como las diferencias entre el estado Meissner y el estado mixto, parte importante de este proyecto. Además se incluye un estado del arte de la superconductividad y de los cojinetes.

En el tercer capítulo se muestra el diseño de los dos mecanismos que se van a analizar, incluyendo dimensiones y partes que componen el mecanismo,

así como la metodología a seguir para la obtención de los resultados de una manera eficiente y con buena calidad.

El cuarto capítulo es el más importante pues es en el que se muestran todos los resultados obtenidos para ambos modelos, así como un apartado para la comparación entre ellos.

En el quinto capítulo se habla sobre distintos materiales superconductores para saber cuál o cuáles se podrían utilizar en el mecanismo para garantizar un estado Meissner puro gracias a los datos obtenidos en el capítulo anterior. Se analizará tanto el Ti-2223 como distintas composiciones de YBaCuO al ser los superconductores que hoy en día ofrecen mejores prestaciones y son los más utilizados para las distintas aplicaciones.

En el sexto capítulo se hace un presupuesto ajustado para la realización completa de este proyecto y en el caso de que se hiciesen análisis experimentales.

En el séptimo capítulo se escriben las conclusiones que se han podido obtener de este proyecto y se verifica si se ha cumplido con los objetivos propuestos inicialmente.

En el último capítulo, el octavo, se muestran todas las referencias que se han consultado para la completa elaboración del presente proyecto.

Finalmente, este proyecto cuenta con un anexo en el que se explica cómo realizar el cálculo del campo magnético tangencial en Ansys Maxwell v15 al no ser una variable que, por defecto, el software pueda calcular.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. FUNDAMENTOS DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

2.1.1. Introducción al fenómeno de la superconductividad

La superconductividad es la propiedad de ciertos materiales que en determinadas condiciones reúnen dos características principales: la pérdida total de su resistencia eléctrica y la aparición del **efecto Meissner-Ochsenfeld**. [1].

Estas dos propiedades implican dos pilares fundamentales del fenómeno de la superconductividad: la **conductividad eléctrica perfecta** y el **diamagnetismo perfecto**. Esto hace al superconductor ideal impermeable a los campos magnéticos exteriores a partir de una longitud de penetración λ (ver Figura 2.1). Dicha longitud de penetración es específica de cada material.

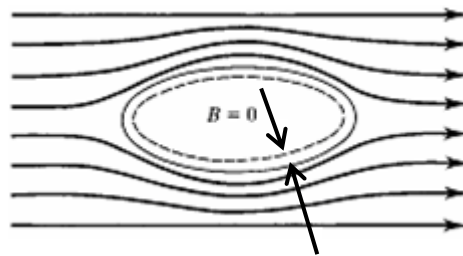


Figura 2.1 Representación de un material superconductor expuesto a campo magnético exterior

La conductividad eléctrica perfecta aparece cuando la temperatura a la que se encuentra el superconductor es inferior a la temperatura crítica de dicho material, como se muestra en la figura 2.2. Una vez sobrepasada dicha temperatura, el superconductor se comporta eléctricamente similar a un metal cualquiera.

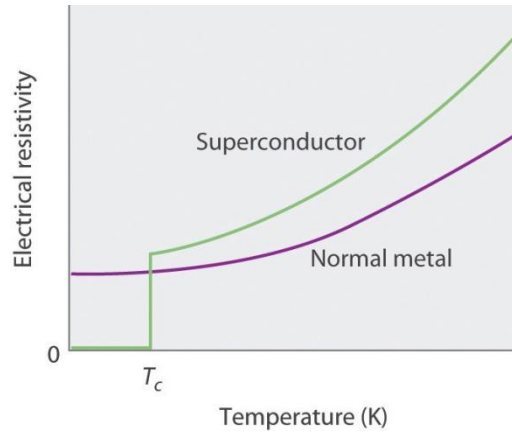


Figura 2.2. Resistividad eléctrica de un superconductor dependiendo de la temperatura

También se debe tener en cuenta el campo magnético exterior al que está expuesto el superconductor. Un campo magnético grande es capaz de destruir la superconductividad. En la figura 2.3 se muestra la dependencia de este campo crítico con la temperatura.

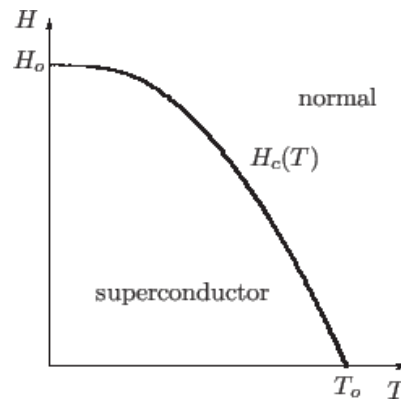


Figura 2.3 Variación del campo magnético crítico dependiendo de la temperatura

Otro punto importante a considerar de la superconductividad es la presencia de discontinuidad en el calor específico de los materiales superconductores en la temperatura crítica. La variación está regida mediante la ecuación 2.1. En un principio, dicho calor específico aumenta paulatinamente para después variar de la forma que muestra la ecuación mencionada anteriormente.

$$C_v = aT + bT^3 \quad \text{si } T > T_c \quad (2.1)$$

$$C_v = \begin{cases} \text{constante} \cdot T^3, & \text{si } T \sim T_c \\ \text{constante} \cdot e^{\frac{-aT_c}{T}}, & \text{si } T \sim 0 \end{cases}$$

Donde:

- C_v es el calor específico del material expresado en J/Kg·K.
- T es la temperatura del superconductor expresada en K.
- a y b son constantes que dependen del material utilizado en el superconductor.
- T_c es la temperatura crítica del superconductor expresada en K.

2.1.2. Evolución histórica

La superconductividad fue descubierta por un grupo de científicos liderado por **Heike Kamerlingh Onnes** en el año **1911**. Este grupo estaba investigando las propiedades del mercurio a muy bajas temperaturas cuando se dieron cuenta que, a una cierta temperatura (4.2 K específicamente), la resistencia eléctrica caía bruscamente hasta un valor nulo (ver figura 2.4). En este mismo año se da cuenta que también existe un **campo magnético crítico** que destruye la superconductividad del material incluso estando por debajo de la **temperatura crítica**.

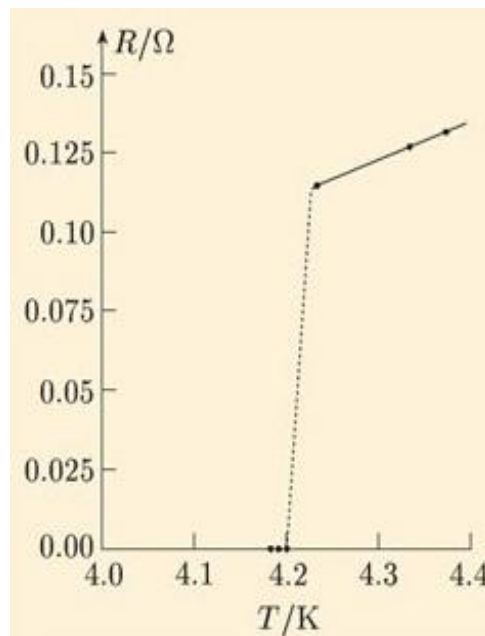


Figura 2.4 Resultados del experimento con mercurio de Onnes en 1911

El siguiente hecho relevante en la evolución de la superconductividad ocurre en **1933** con la investigación llevada a cabo por Walter **Meissner** y Robert **Ochsenfeld**. Ambos estaban midiendo la distribución de flujo en el exterior de muestras de plomo y estaño por debajo de la temperatura crítica con la presencia de un campo magnético y descubrieron la **desaparición total del flujo del campo magnético en el interior del superconductor**. Este efecto es el que actualmente se le denomina efecto Meissner-Ochsenfeld, o más comúnmente, efecto Meissner.

En **1952**, el físico-teórico ruso Alexei Abrikosov explicó cómo los campos magnéticos penetran en forma de vórtices en el superconductor. Estos campos generan un **estado mixto** o estado de Abrikosov que explican el comportamiento entre las temperaturas críticas superior e inferior de los superconductores de tipo II (ver apartado 2.2.2).

Desde las década de los 50 hasta la década de los 80 hubo varios descubrimientos también fundamentales para el desarrollo de la superconductividad como la teoría desarrollada por Cooper y Schieffer explicando ésta desde los efectos microscópicos en vez de efecto macroscópicos como en las teorías anteriores.

Ya en 1986, Maw-Kuen Wu y Paul C. W. Chu desarrollan la famosa pieza cerámica superconductora YBaCuO. La principal ventaja es que su temperatura crítica se encuentra a 93 K y por tanto puede enfriarse con nitrógeno líquido en vez de helio líquido (más fácil de conseguir y más barato). Desde entonces, los descubrimientos de nuevos superconductores se han incrementado notablemente.

En esta última década se han descubierto otros tres materiales superconductores, cada uno con una propiedad distinta que le diferencia. El bromuro de magnesio **MgBr₂** cuya temperatura crítica es 39 K y con el que se pueden fabricar **cables** a diferencia de otros compuestos cerámicos de mayor temperatura crítica. La dificultad de utilizar este componente es que es complicado sintetizarlo. Más tarde apareció un compuesto de silicona e hidrógeno que, sometido a grandes presiones, es capaz de trabajar como

superconductor a temperaturas muy altas donde no es necesario utilizar ningún tipo de refrigerante.

En la figura 2.5 se muestra de manera cronológica los materiales superconductores con sus respectivas temperaturas críticas.

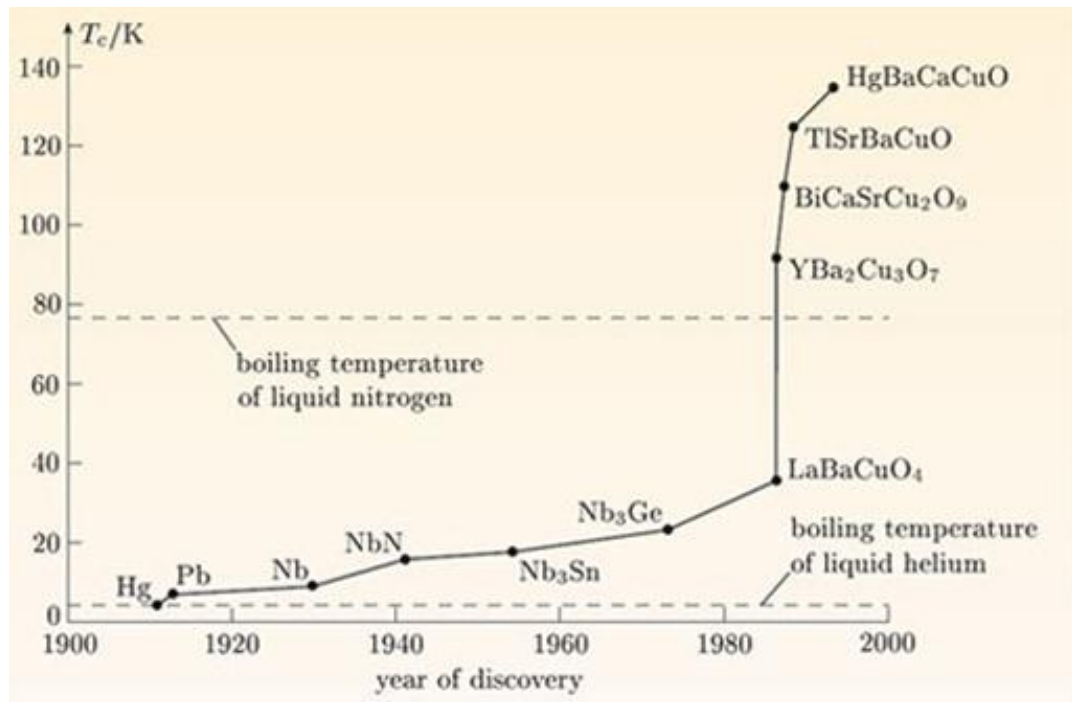


Figura 2.5 Orden cronológico del descubrimiento de materiales superconductores

2.1.3. Clasificación de los superconductores

La clasificación de los superconductores se puede hacer atendiendo a diferentes criterios. Se van a analizar los tres criterios más comunes: por la temperatura crítica, por el comportamiento físico y por la teoría que los explica.

1. Temperatura crítica

Esta clasificación se adapta a la temperatura crítica del material superconductor. El valor de referencia de temperatura crítica es de **77 K** ya que a partir de esta temperatura se puede emplear **nitrógeno líquido** para enfriar el superconductor, mientras que para temperaturas inferiores es necesario utilizar helio líquido, cuyo coste es mucho mayor y requiere un manejo más complicado. Por tanto, los tipos de superconductores atendiendo a este criterio son:

- **Superconductores de baja temperatura:** Su temperatura crítica hacia el estado de superconductividad es menor de 77 K.



Figura 2.6 Cables de Nb_3Sn

- **Superconductores de alta temperatura:** Su temperatura crítica hacia el estado de superconductividad es mayor de 77 K.



Figura 2.7 Pastillas de $YBaCuO$

2. Comportamiento físico

Atendiendo al comportamiento físico de los superconductores, existen dos clases:

- **Tipo I:** Este tipo de superconductor es capaz de repeler todo el campo magnético de su interior hasta que un cierto valor de campo magnético exterior rompe con el estado superconductor. Todos aquellos superconductores que se encuentran en este estado, se dicen que están en estado Meissner.
- **Tipo II:** A este tipo pertenecen los superconductores en cuyo interior el campo magnético pasa por un estado de transición donde ciertas líneas de flujo (vórtices) se introducen en él sin destruir el estado superconductor. Este estado se produce entre el estado normal y el estado superconductor, y se conoce como estado mixto.

En la figura 2.8 se muestran ambos tipos de superconductores y las fases que cada uno de ellos atraviesa dependiendo del campo magnético exterior al que estén sometidos.

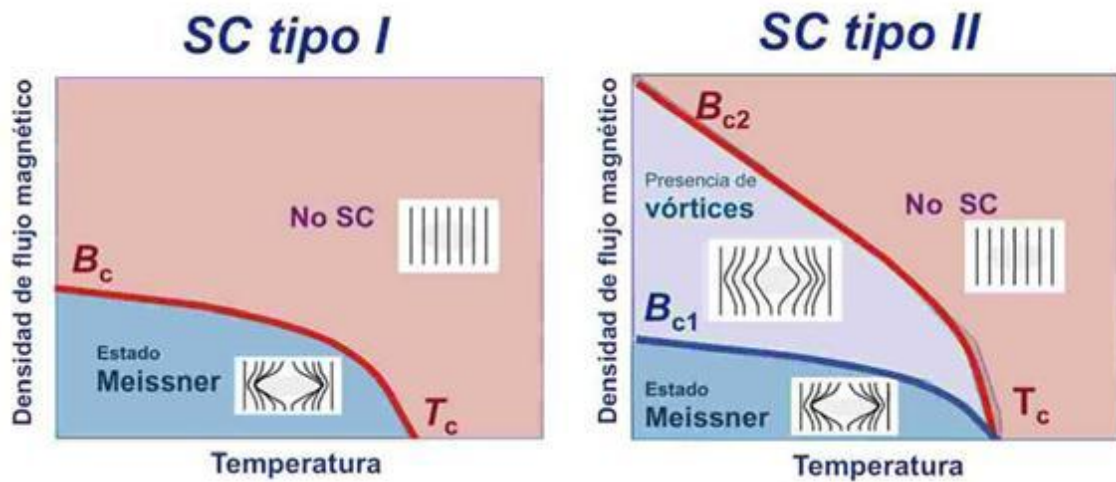


Figura 2.8 Estados del superconductor dependiendo de su comportamiento físico

3. Por la teoría que los explica

La teoría común que explica la superconductividad y la aceptada actualmente es la teoría Bardeen-Cooper-Schrieffer o teoría BCS. A partir de esta teoría se consigue la siguiente clasificación:

- **Superconductores exóticos:** Su comportamiento no se puede explicar con la teoría BCS. Para su estudio se emplea la teoría de Ginzburg-Landau, que se basa en una teoría macroscópica. A este grupo pertenecen la mayoría de los superconductores de tipo II.
- **Superconductores convencionales:** Su comportamiento sí se puede explicar con la teoría BCS. A este grupo pertenecen la mayoría de los superconductores de tipo I y metales como el mercurio.

2.2. ESTADO MEISSNER FRENTE A ESTADO MIXTO

En este apartado se van a explicar ambos estados remarcando aquellos puntos fuertes y débiles de cada uno. Es por ello que, aunque conforman una parte esencial de los fundamentos de la superconductividad, se ha creído conveniente explicar ambos en un apartado diferente.

2.2.1. Estado Meissner

El estado Meissner se caracteriza, como se ha comentado en apartados anteriores (ver apartado 2.1.1), por la expulsión del campo magnético del interior de un material superconductor bajo ciertas circunstancias de temperatura y campo magnético exterior aplicado que permiten al material mantener su superconductividad. La expulsión del campo magnético del superconductor se produce aunque el estado de superconductividad se alcance antes o después de que el campo magnético exterior sea aplicado (ver figura 2.9) [2]. Esto último es lo que realmente diferencia a un superconductor en estado Meissner de un conductor perfecto.

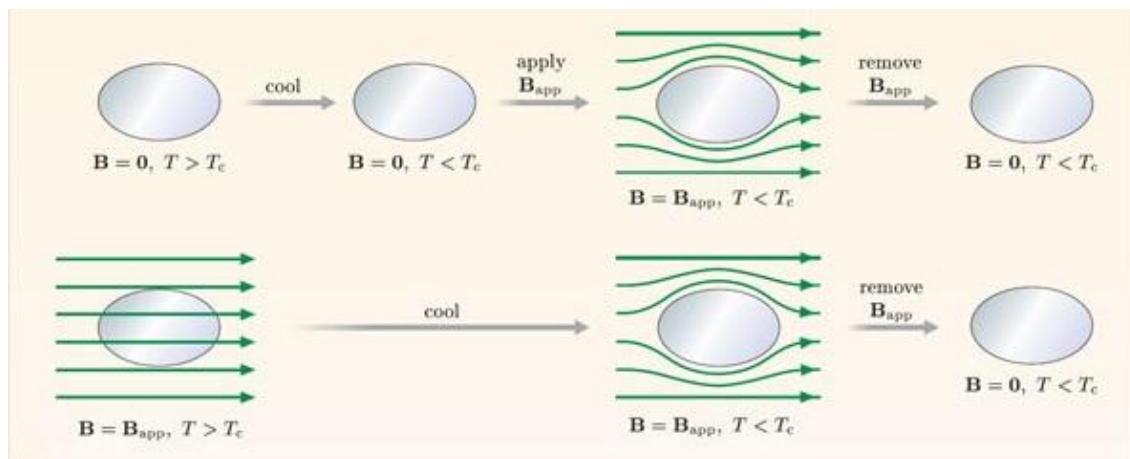


Figura 2.9 Comportamiento de un superconductor en estado Meissner

El campo magnético es expulsado del interior del superconductor gracias a **corrientes** que se producen en la superficie del material y cuya dirección es tal que produce un campo magnético que **cancela al campo magnético exterior** aplicado.

En el caso de tener un imán permanente y un material en estado superconductor, si se acercase el imán al superconductor, este sería repelido por las **fuerzas de repulsión** que el superconductor genera. Sin embargo, si se forzase a aproximar ambos aún más, el campo magnético aplicado sería tal que el superconductor crearía un campo magnético para anular el anterior. De esta manera, el imán quedaría en una posición estable, estando en equilibrio en los **6 grados de libertad del espacio** (ver figura 2.10).

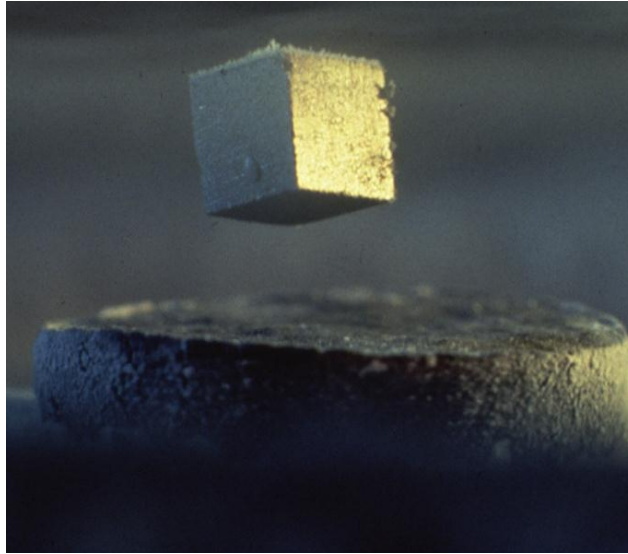


Figura 2.10 *Levitación de un imán permanente sobre un superconductor*

2.2.2. Estado mixto

El **estado mixto** aparece, como se ha comentado anteriormente (ver apartado 2.1.3), en superconductores de tipo II. Este estado se encuentra entre el estado de superconductividad y el estado normal y se basa en la **penetración parcial del campo magnético aplicado**, formando vórtices dentro del material superconductor (ver figura 2.11) pero manteniendo aun así el estado de superconductividad. En este estado no sólo se obtienen fuerzas de repulsión propias del efecto Meissner, sino que también aparecen fuerzas de atracción propiciadas por la magnetización parcial en forma de vórtices. De esta manera se consiguen puntos de **levitación muy estables**.

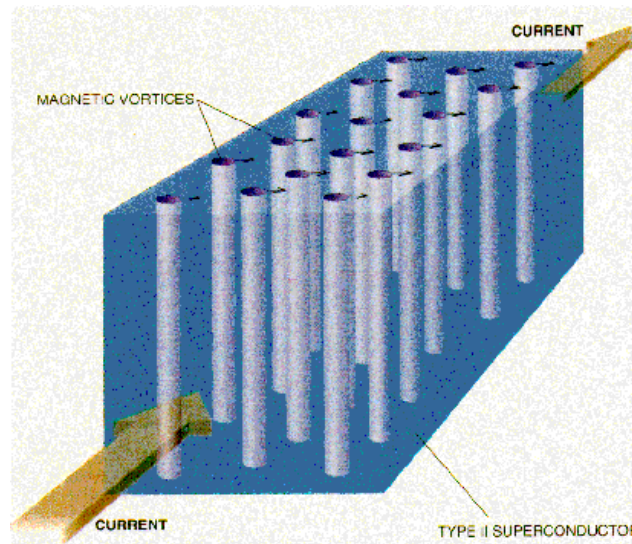


Figura 2.11 *Vórtice magnéticos formados en estado superconductor mixto*

2.2.3. *Diferencias entre ambos estados*

El presente proyecto, como se detallará más adelante, se ha modelado en un estado Meissner completo y de ahí la importancia de ver aquellos puntos fuertes y débiles con respecto al estado mixto.

Primeramente se comentan las condiciones que se tienen que dar para encontrar un estado u otro. Como se ve en la figura 2.8, la temperatura crítica no cambia para un estado u otro ya que depende exclusivamente del material. Sin embargo, el campo magnético aplicado es importante y será el que determine el estado en el que se estará trabajando. El estado Meissner requiere unas condiciones más restrictivas al poder soportar un **campo magnético exterior menor que el estado mixto**, cuyo rango es mucho mayor.

Entrando en el aspecto mecánico de un sistema formado por un superconductor y un imán permanente, el siguiente parámetro importante que diferencia a ambos estados es la **fuerza de levitación** que es capaz de ejercer para mantener el imán permanente en una posición estable.

Este es un punto a favor del estado mixto ya que la fuerza de levitación que es capaz de ejercer es mayor que la que puede producir las fuerzas de repulsión del estado Meissner. Esto se debe a que cuando se acerca el imán permanente cada vez más al superconductor, el campo magnético exterior aplicado a éste aumenta hasta que rebasa el campo crítico de Meissner y se

sitúa en el estado mixto. Una vez en el estado mixto, las fuerzas de repulsión aumentan conforme se acercan imán-superconductor ya que el límite de campo crítico es alto. La figura 2.12 muestra de una manera clara este caso y el **problema histerético** [3] que se detalla a continuación.

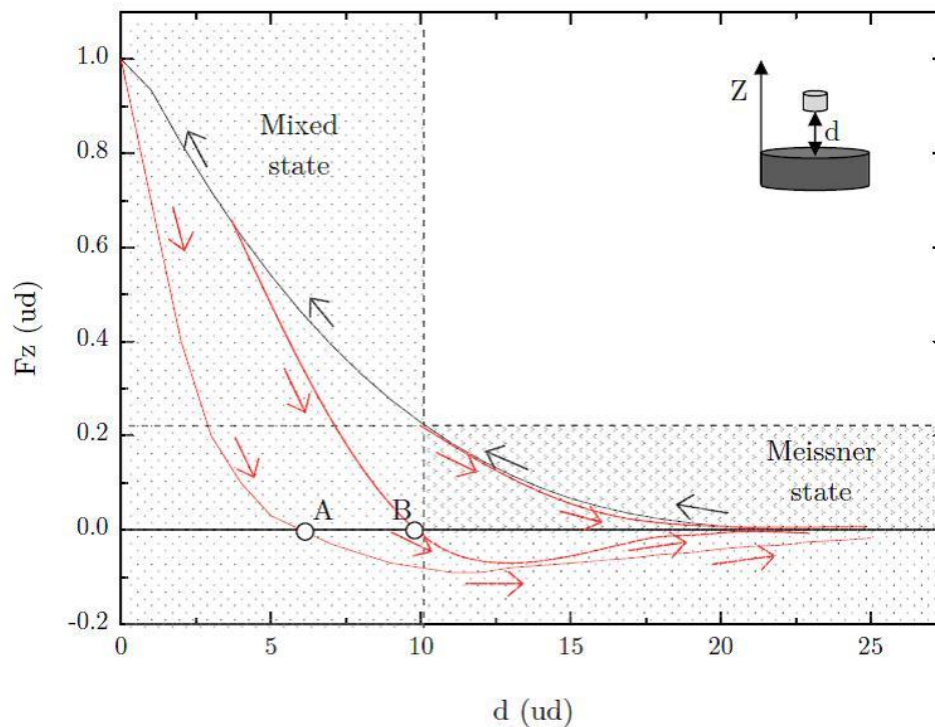


Figura 2.12 Fuerza de levitación dependiendo de la altura en ambos estados superconductores

Se puede observar cómo, en el momento que se aproxima el imán al superconductor en estado Meissner, la fuerza de levitación empieza a aumentar. Si se sigue acercando el imán cada vez más, se atraviesa el límite del estado Meissner completo y por tanto el superconductor empieza a magnetizarse. Esto hace que si se aleja el imán, el camino de vuelta no es el mismo sino que sigue un camino diferente, e incluso en algunos puntos se generan fuerzas atractivas. Además, se consiguen puntos de estabilidad (puntos A y B de la figura 2.12) gracias a esa magnetización.

Según lo comentado hasta ahora podría parecer que trabajar en estado mixto siempre es mejor que trabajar en estado Meissner. Sin embargo, hay un punto muy a favor del estado Meissner, y es la **histéresis** que se produce en este mecanismo.

Se puede ver en la figura 2.12 como dentro del estado Meissner, la fuerza cuando se acerca el imán es la misma que la fuerza cuando este se aleja. Esto implica que la histéresis es nula, lo que supone un gran avance en el ámbito del diseño de mecanismos que requieran un control muy preciso de la posición o del movimiento de una parte en concreto. Esto no ocurre cuando el superconductor se encuentra en estado mixto. En este caso, la fuerza que se ha ejercido sobre el imán para acercarlo al superconductor es distinta a cuando éste se aleja, lo que implica una pérdida de energía en el proceso. Esta histéresis se puede convertir en un problema cuando el proceso se repite muchas veces ya que la **pérdida de energía** puede ser considerable.

En este proyecto se ha trabajado en estado Meissner debido a que la fuerza de levitación necesaria es pequeña y la histéresis es nula. Además, permite trabajar en un amplio rango sin sobrepasar el límite de este estado como se verá más adelante y con una gran **precisión**, una de las ventajas principales en este mecanismo.

2.3. APLICACIONES

2.3.1. Estado del arte

La aplicación de superconductores se ha incrementado en las últimas décadas gracias al desarrollo de materiales cuya temperatura crítica es cada vez mayor, hasta el punto de poder utilizar nitrógeno líquido para su enfriamiento, un compuesto barato y fácil de manejar. Actualmente se utilizan en campos muy diversos y ello ha supuesto un gran avance debido a su utilidad.

A continuación se comentan de manera breve las aplicaciones más comunes hoy en día.

- Transporte: El ejemplo más conocido en este campo es el **SCMaglev** de Japón (figura 2.13). Su funcionamiento se basa en el efecto Meissner y reduce la fricción en el contacto rueda-carril del vehículo ferroviario. Esto permite una mejoría notable en la seguridad del desplazamiento ya que el

riesgo de descarrilamiento se reduce drásticamente [4]. Además, como desaparecen los efectos de disipación de la energía debido al rozamiento, se pueden obtener vehículos ferroviarios mucho más **eficientes energéticamente** hablando y las emisiones de **gases contaminantes** serían prácticamente **nulas**.



Figura 2.13 *MAGLEV en Yamanashi, Japón*

- Física: El dispositivo donde los superconductores tienen un papel muy importante dentro del campo de la física es en los aceleradores de partículas (figura 2.14). Para este dispositivo se necesita impulsar las partículas hasta velocidades cercanas a la luz y para ello se necesitan campos magnéticos muy potentes. Es por ello que la utilización de electroimanes contruidos con superconductores se hace imprescindible.

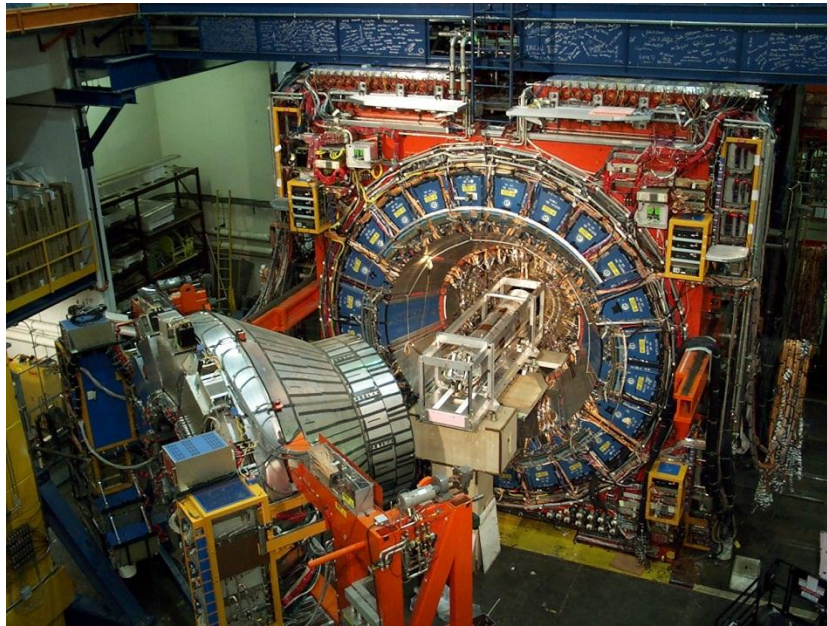


Figura 2.14 LHC en Ginebra, Suiza

- Astronomía: En este campo hay que destacar el descubrimiento de Fritz London, en el que esferas superconductoras girando sobre sí mismas generan un campo magnético alineado con su eje de giro [5]. Esto permite el **posicionamiento ultrapreciso de satélites** que son mandados al espacio exterior a la actualidad. Además, como las temperaturas son cercanas al cero absoluto, no es necesario ningún tipo de refrigeración.
- Medicina: Actualmente se emplea en los dispositivos de resonancia magnéticas. Se emplea también en aparatos **SQUID** (Superconducting Quantum Interference Devices) ya que son capaces de detectar campos magnéticos con una intensidad de hasta 100 billones de veces inferior al campo magnético de la Tierra. Esto lo hace muy útil para analizar órganos internos sin aplicar grandes campos magnéticos. El caso más brillante es el análisis del cerebro humano ya que éste genera, debido a las corrientes eléctricas existentes, campos magnéticos de intensidades muy bajas (figura 2.15).



Figura 2.15 Imagen del cerebro humano gracias a MRI

2.3.2. Futuras aplicaciones

Una de las aplicaciones más esperadas está en el uso de la superconductividad en **generadores y máquinas de alto rendimiento** más eficientes. El rendimiento de éstos estaría en un 99% y su tamaño se vería reducido a la mitad si se compara con los generadores que existen hoy día.

Combinado con esta última tecnología, también se podrían utilizar **cables superconductores** que aumentarían la transmisión de energía y se mejoraría en un 7000 % la eficiencia teniendo en cuenta el espacio utilizado [6].

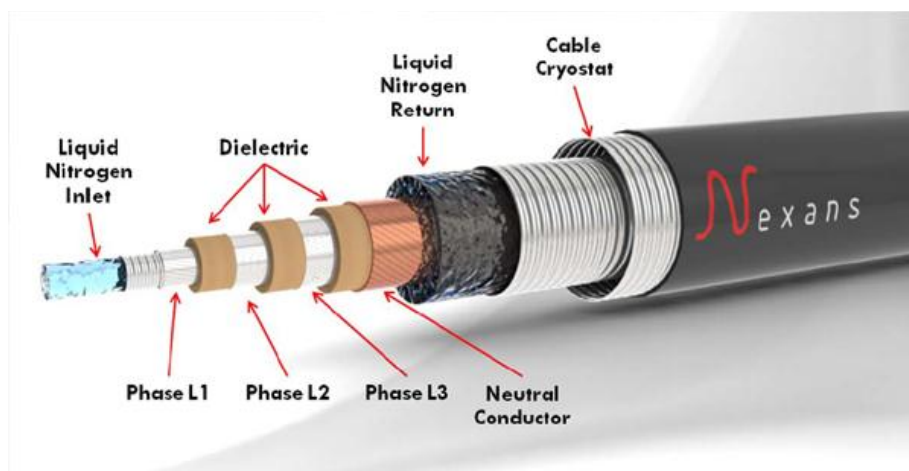


Figura 2.16 Cable con tecnología superconductora para evitar pérdidas eléctricas

2.4. COJINETES: ESTADO DEL ARTE

Muchas industrias como la aeroespacial, comunicaciones, óptica y biomédica están demandando cada vez más mecanismos muy precisos que sean capaces de trabajar en entornos criogénicos ($T < 123 \text{ K}$) [1]. El **ratio de señal/ruido** en cualquier sensor se **incrementa** cuanto menor es la temperatura, lo que hace que los entornos criogénicos sean idóneos para medidas precisas como, por ejemplo, los utilizados para **interferometría espectroscópica infrarroja** [7], [8] (ver figura 2.17).

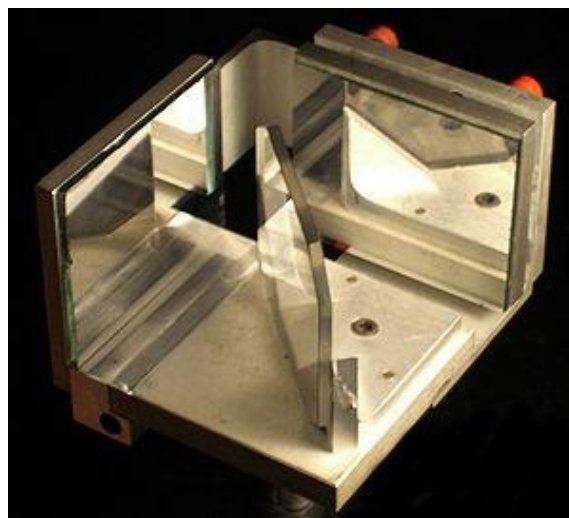


Figura 2.17 Interferómetro con tecnología infrarroja

A temperaturas muy bajas, los mecanismos convencionales presentan problemas tribológicos en cojinetes y uniones como fatiga, desgaste, puntos fríos y juego [9], [10], [11]. Una posible solución sería el uso de lubricantes sólidos como PTFE o MoS_2 para estas bajas temperaturas [12], [13]. Sin embargo, para un ciclo de vida largo, los lubricantes sólidos no resultan ser una buena solución.

Ante la falta de una solución factible con los cojinetes convencionales, se propusieron **cojinetes levitantes** sin contacto como una **solución a los problemas tribológicos**, donde los dos principales son la fatiga y el desgaste [14], [15], [16].

Hay diversos tipos de cojinetes que usan la levitación para evitar el contacto entre partes rotativas, como cojinetes de aire, cojinetes magnéticos activos o cojinetes magnéticos superconductores. Sin embargo, no todos ellos son propicios para entornos criogénicos. Por ejemplo, no es posible utilizar los cojinetes hidrodinámicos o los **cojinetes de aire** para aplicaciones a bajas temperaturas debido a que el fluido se congela en esas condiciones [17] (ver figura 2.18).

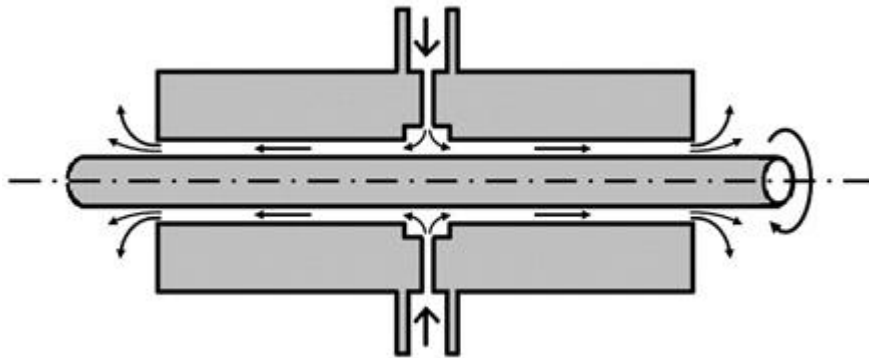


Figura 2.18 *Cojinete de aire. La entrada del fluido se produce por los laterales con tal fuerza que se evita el contacto del eje.*

Los **cojinetes magnéticos activos** requieren una generación activa de fuerzas magnéticas aplicadas gracias a bobinas [18-20]. Las corrientes que circulan por estas **bobinas producen un gran flujo de calor** en el sistema, lo cual es algo indeseable para entornos criogénicos. Se muestra un ejemplo de estos cojinetes en la figura 2.19.



Figura 2.19 *Cojinete magnético activo*

Los **cojinetes magnéticos pasivos** basados en partes magnéticas son normalmente inestables en, al menos, una dirección, por lo que necesitan un cojinete convencional para mantener la estabilidad y, por lo tanto, otra vez aparecen los problema tribológicos a bajas temperaturas [21], [22] excepto en algunos casos especiales [23], [14].

Los dispositivos basados en **levitación magnética superconductora (SML)** parecen una buena opción para actuadores y posicionadores en entornos criogénicos. SML proporciona una levitación estable por sí misma de un imán permanente (PM) sobre un superconductor de alta temperatura (HTS) [24], [25] (ver figura 2.20).

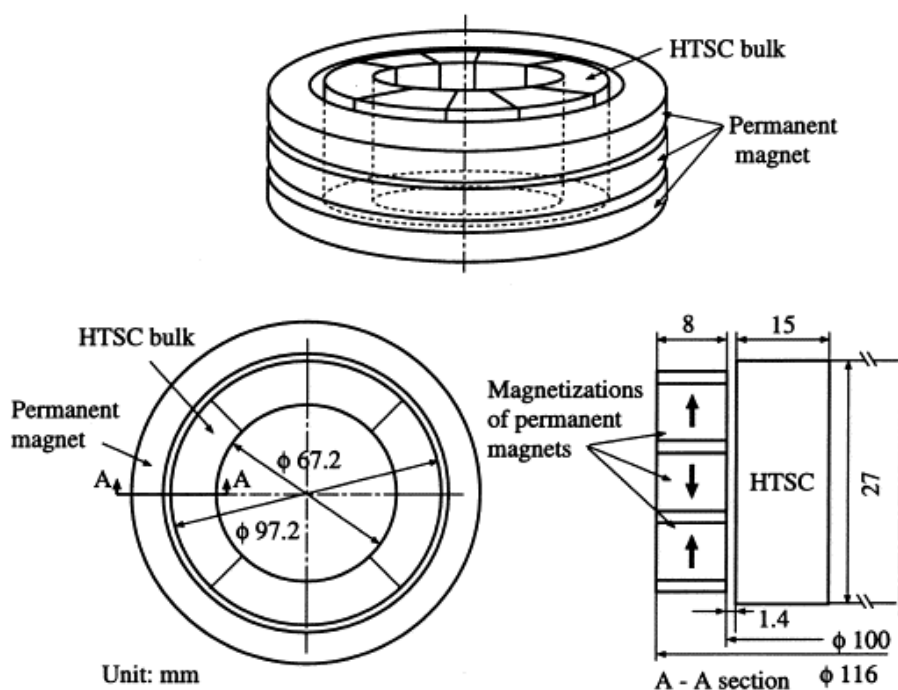


Figura 2.20 Cojinete basado en SML

A temperaturas criogénicas, el HTS está normalmente en estado superconductor y no se necesita ningún tipo de refrigeración. Sin embargo, no se ha prestado mucha atención a la utilización de esta tecnología para **posicionadores**. Con algunos tipos de transportadores se han obtenido resultados razonables con carreras de no más de unos pocos milímetros y resoluciones en el rango de μm [26], [27]. Recientemente, se ha investigado un cojinete lineal basado en SML y los autores afirman conseguir una **carrera** máxima de **18 mm** en una dirección con una **resolución muy alta** [28], [29]. La

principal limitación de las deslizaderas lineales precisas sin contacto es que la carrera está limitada a unos pocos milímetros.

No obstante, hasta ahora la mayoría de los dispositivos mecánicos experimentales basados en SML han mantenido los superconductores no en estado Meissner, sino en estado mixto. En este caso, la magnetización de los superconductores proporciona una región estable sin contacto pero también genera una histéresis cuando se mueve más allá de su posición estable [30].

Por el contrario, la magnetización de un superconductor en estado Meissner es no histerética y, por tanto, tampoco lo son las fuerzas de levitación. Un estado Meissner puro no produce fricción en absoluto. Cómo diseñar un mecanismo levitante estable manteniendo el superconductor en estado Meissner es un reto abierto con muchas aplicaciones, como el posicionamiento de precisión o confinamiento magnético para aplicaciones en plantas nucleares [31].

3. DISEÑO Y METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se presenta el diseño mecánico de un **cojinete magnético lineal levitador** adecuado para trabajar en un cierto rango de desplazamiento y fuerzas para obtener un sistema no histerético, es decir, trabajando en estado Meissner. Aunque se presentan dos mecanismos (ver figura 3.1), ambos son similares con pequeñas diferencias para mejorar su rendimiento. El diseño principal del HTS es **semicilíndrico**, lo que permite un posicionamiento de equilibrio estable y fuerzas restauradoras en todos los grados de libertad excepto en dos: rotación y desplazamiento en X. Además el sistema cuenta con un imán permanente de forma cilíndrica que levita a lo largo del eje de revolución o carrera.

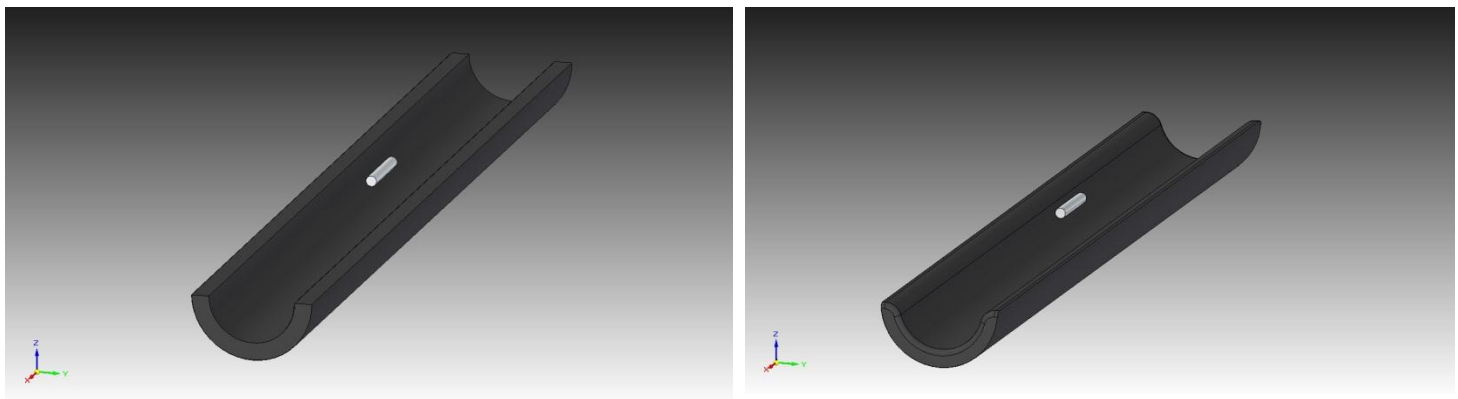


Figura 3.1 *Mecanismo original (izquierda) y mecanismos mejorado (derecha) analizados*

Como se ve en la figura 3.1 derecha, los bordes del mecanismo mejorado se han redondeado. Esto se debe al “**efecto borde**” que aparece en esas zonas y que modifica el comportamiento del sistema. Más adelante se explica con detalle y resultados este efecto (ver apartado 4.1.3).

Para este proyecto se ha llevado a cabo un análisis de fuerzas en cada dirección del espacio basado en el **método de elementos finitos**. De esta manera se verifica la posición de equilibrio del cojinete lineal, así como su rigidez radial y axial. Una vez obtenido estos datos, se demuestra que el mecanismo puede trabajar a temperaturas inferiores a 100 K dependiendo del

material superconductor. De hecho, con una buena elección de dicho material se puede asegurar un estado Meissner puro, y por tanto, que el desplazamiento sea completamente no histerético.

Este cojinete lineal puede ser adecuado para posicionamiento preciso con carreras largas ya que el rango de movimiento axial se puede modificar fácilmente incrementando la longitud del superconductor. Si, además, se utiliza un **sistema actuador** en combinación con este mecanismo para un grado de libertad (desplazamiento en X, por ejemplo), se puede usar para posicionamientos muy precisos en entornos criogénicos debido a que este sistema permite controlar el desplazamiento en dicho eje.

3.2. DISEÑO DEL MECANISMO

El diseño del mecanismo levitador para un desplazamiento lineal tiene que ser capaz de generar fuerzas restauradoras en todos los grados de libertad excepto en el del desplazamiento axial.

Antes de hablar sobre el diseño propio utilizado en este proyecto, así como sus dimensiones, es importante comentar ciertas “reglas” de diseño que se cumplen en este tipo de mecanismos para conseguir direcciones de desplazamiento pasivas y estables. Estas reglas se han obtenido de la literatura [32-37]:

- Un dipolo magnético siempre es repelido por la superficie del superconductor.
- Un dipolo magnético tiende siempre a orientarse paralelo a la superficie del superconductor.
- Un dipolo magnético tiende siempre a orientarse tangencial a la curva del superconductor.
- La fuerza disminuye a la cuarta potencia con la distancia.
- El sumatorio de fuerzas de superficie del imán-superconductor puede generar posiciones de levitación estables e inestables.

Gracias a estas reglas se pueden conseguir consideraciones rápidas sobre el diseño adecuado para estos mecanismos. De cualquier modo, siempre es necesario analizar cuantitativamente con herramientas analíticas y numéricas.

Una vez que se conocen las reglas básicas para el diseño en este tipo de mecanismos, resulta apropiado pensar en un superconductor con **forma de “U”**. El primer motivo para utilizar esta forma viene impulsado por la primera regla del diseño mecánico: siempre hay fuerzas de repulsión por parte del superconductor. El segundo motivo es que, con esta forma, se consigue tener unas condiciones de contorno laterales que permiten guiar el desplazamiento axial y otra condición de contorno que proporciona la carga de levitación. En cuanto al imán permanente, su magnetización está orientada axialmente para que de esta manera tienda a alinearse paralelo a cualquier superficie del superconductor (ver figura 3.2).

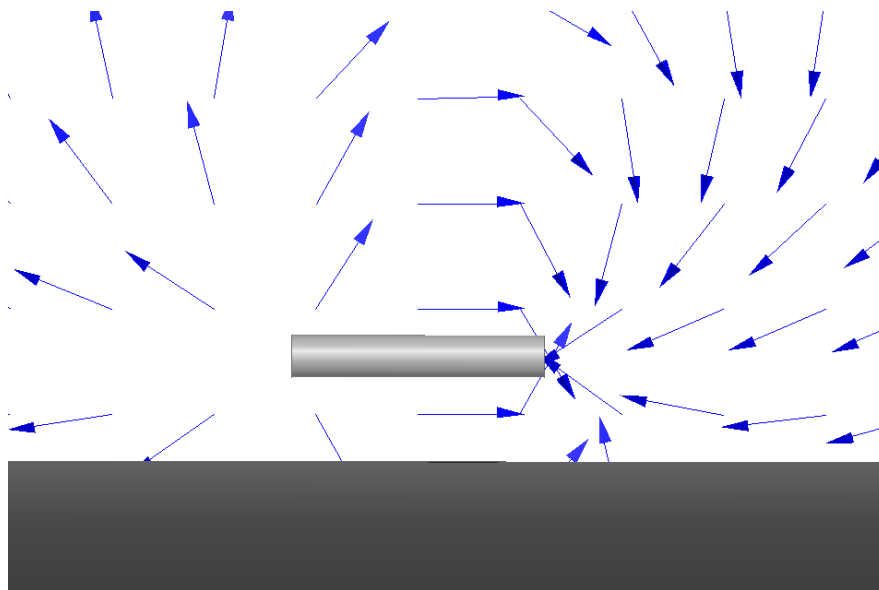


Figura 3.2 *Dirección de magnetización axial del imán permanente*

Ahora que ya se conoce el diseño del mecanismo en bases generales, se puede dimensionar de manera que se obtenga un buen rendimiento del sistema completo. La definición exacta del diseño mecánico se muestra en la figura 3.3 y figura 3.4.

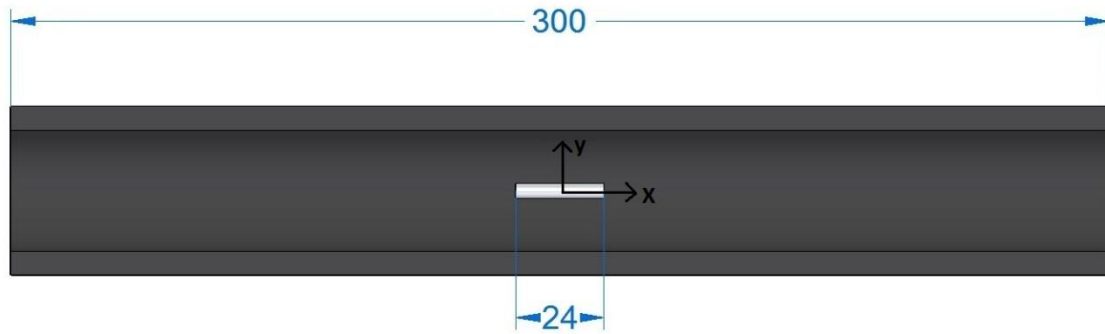


Figura 3.3 Vista de planta del mecanismo

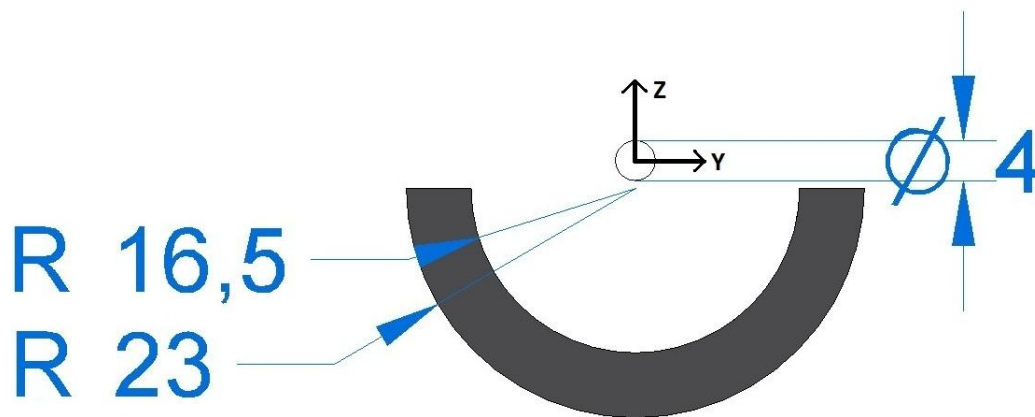


Figura 3.4 Vista de perfil del mecanismo

El modelo que se muestra en la figura 3.3 y figura 3.4 corresponde con el **mecanismo original**. El **mecanismo mejorado** tiene las mismas dimensiones que éste, pero con la diferencia de que sus bordes tienen un redondeo de 2 mm de radio. Se puede ver un boceto de este mecanismo en la figura 3.2 derecha.

La longitud del superconductor (300 mm) se ha diseñado para tener un gran rango de desplazamiento alejado del borde, donde las fuerzas de levitación y restauradora disminuyen, como se verá en el capítulo 4.

Para la elección de los radios del superconductor se ha llevado a cabo un análisis por elementos finitos de las fuerzas que éste genera. Cuanto mayor es el volumen del superconductor, mayor es la fuerza de levitación pero menos estable es, por tanto, la posición del imán permanente con las dimensiones determinadas al encontrarse más alejado de las paredes laterales.

Las dimensiones del imán permanente se han escogido basándose en **imanes permanentes de neodimio-hierro-boro** que se encuentran habitualmente en stock. Se escoge un radio de 2 mm para conseguir que la posición sea lo más estable posible al encontrarse muy centrado con respecto al superconductor. El peso de este imán es de **22.18 N**. En la figura 3.5 se muestra la fuerza de levitación dependiendo del radio del imán permanente.

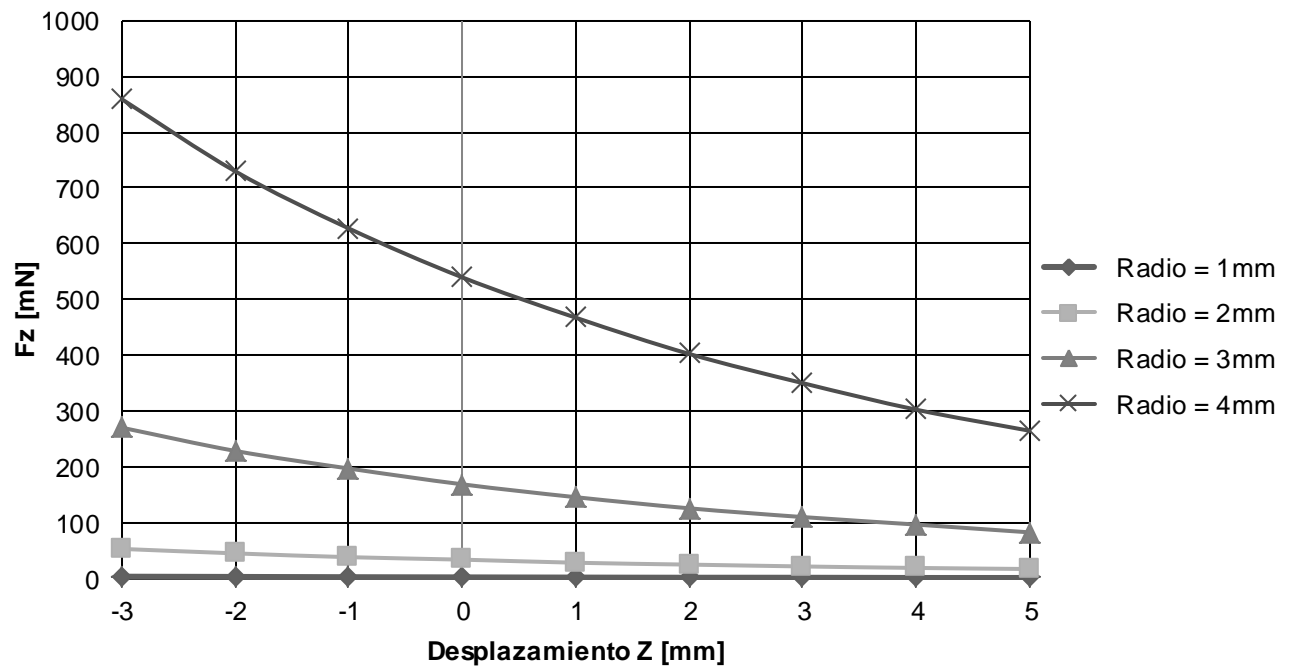


Figura 3.5 Fuerza de levitación dependiendo del radio del imán permanente

3.3. METODOLOGÍA UTILIZADA

En este proyecto se ha simulado el mecanismo descrito anteriormente para obtener de una manera analítica resultados relativamente rápidos (el tiempo de obtención de resultados depende de los recursos computacionales de los que se disponga). Para ello se ha empleado el método de elementos finitos al ser la solución más apropiada para este tipo de casos [32] y el que ofrece unos resultados con alta fiabilidad al poder refinar la malla utilizada.

El software utilizado durante todo este proyecto es **Ansys Maxwell v15**. Este es un software de simulación de campos electromagnéticos para ingenieros cuyo objetivo es diseñar y analizar mecanismos electromagnéticos y electromecánicos en 2D y 3D. Entre estos dispositivos se incluyen motores,

actuadores, transformadores, etc. Maxwell utiliza el método de elementos finitos para resolver campos eléctricos y electromagnéticos estáticos y transitorios [38].

Un punto clave de Ansys Maxwell es su proceso de solución automatizado, en el cual sólo es necesario especificar geometría, propiedades del material y la salida deseada. Desde aquí, Maxwell genera automáticamente una malla precisa y apropiada para resolver el problema con rapidez. Este proceso de malla adaptativa quita complejidad del análisis y permite beneficiarse de un flujo muy eficiente y fácil de usar. Otra solución sería elegir uno mismo la malla a utilizar debido a la facilidad de elegir dichas opciones. A parte de poder elegir la longitud de malla, también es posible elegir si se quiere mallar la superficie de las piezas o también interiormente, el número máximo de elementos, cuánto se refina la malla por cada paso computacional, etc. Esto permite obtener soluciones mucho más precisas aunque el coste computacional es mucho mayor.

Otra ventaja de este software es que, al ser parte de Ansys, se puede implementar dentro de un proyecto para hacer análisis estructural en caso de que fuese necesario e incluso mallar el mecanismo con **Ansys Meshing** que ofrece más opciones, como poder refinar la malla en puntos concretos donde el análisis sea crítico. En la figura 3.6 se muestra un ejemplo.

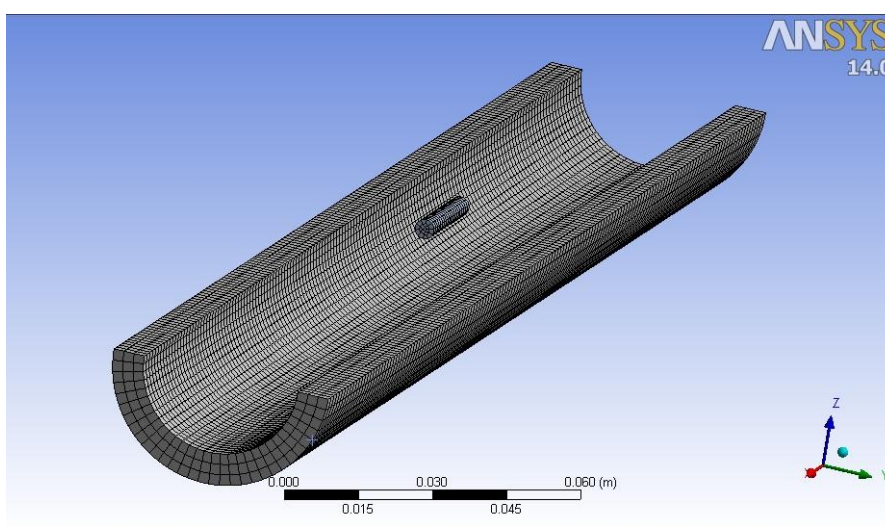


Figura 3.6 *Malla computacional en Ansys Meshing*

Para este proyecto se eligió la malla gracias a las opciones de Ansys Maxwell. Dicha malla se muestra en la figura 3.7.

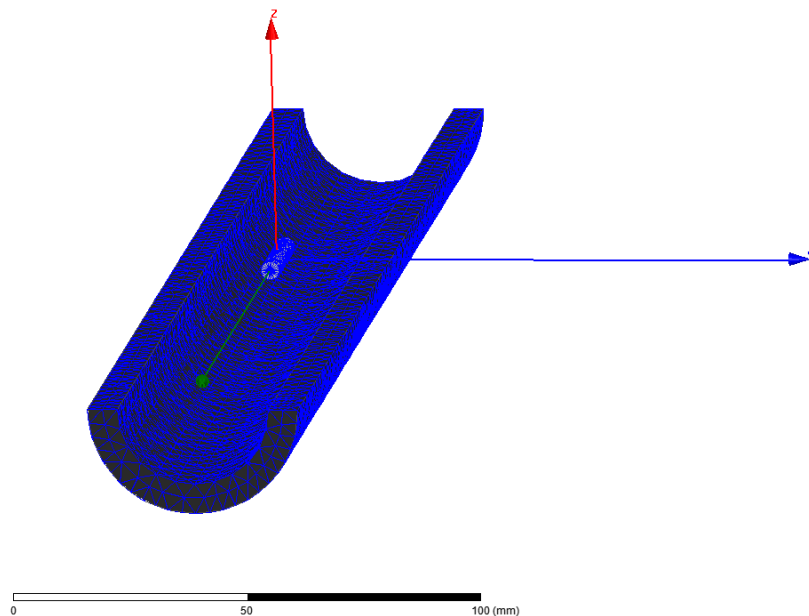


Figura 3.7 Malla computacional en Ansys Maxwell v15

Para saber si la malla utilizada es apropiada y si se van a obtener resultados precisos, se procedió a realizar un estudio de la misma. Para ello se realizó un análisis paramétrico en el cual variaba la malla desde más fina a más gruesa para saber si la malla utilizada en el proyecto se encontraba en un rango adecuado. En la figura 3.8 se muestra dicho estudio.

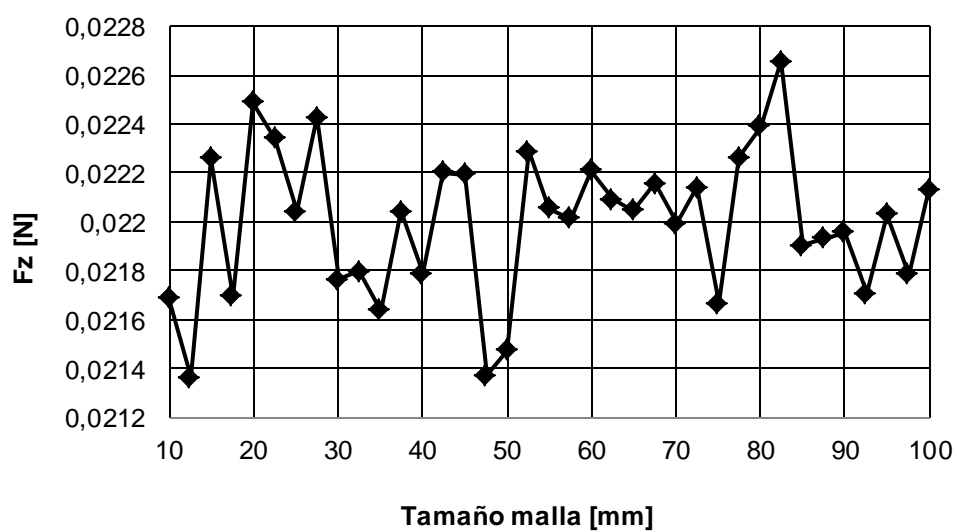


Figura 3.8 Estudio del mallado del mecanismo en Ansys Maxwell v15

Se observa como a medida que la malla se hace cada vez más gruesa, el valor de la fuerza de levitación varía entre los mismos valores. El valor medio que se obtiene es de **0.022 N**, es decir, el peso del imán. Por tanto, la malla que se utiliza es apropiada para obtener valores razonables.

La malla no se ha hecho menor a 10 mm ya que el coste de computación aumenta demasiado y los resultados obtenidos no varían con respecto a los mostrados en la figura 3.8.

4. MODELOS Y RESULTADOS

4.1. MECANISMO ORIGINAL

Como se ha explicado en apartados anteriores, este mecanismo no es el más apropiado para el objetivo de este proyecto. Sin embargo, éste fue el primero y, gracias a los resultados que se obtuvieron, se pudo pensar en la idea para mejorar el rendimiento del mecanismo mejorado.

Debido a esto, es importante mostrar todos los resultados que se obtuvieron con este mecanismo y, de esta manera, poder hacer una comparación de ambos mecanismos al final del capítulo.

4.1.1. Desplazamiento Z

Ya se ha explicado que el superconductor genera fuerzas de repulsión, de las cuáles una parte contribuye a la **levitación del imán permanente** y otra parte contribuye a **restaurar la posición** de dicho imán cuando se producen desviaciones. El primer análisis que se lleva a cabo consiste en averiguar a qué distancia se encuentra la posición de equilibrio del imán permanente. El sistema de coordenadas utilizado para este análisis es diferente que para el resto. En este caso, este sistema está centrado respecto al superconductor y no al imán permanente como el que se mostraba en la figura 3.3. Por tanto, una posición en la dirección Z de 0 mm corresponde con la alineación del centro del imán con el centro de la circunferencia que describe el superconductor como se muestra en la figura 4.1.

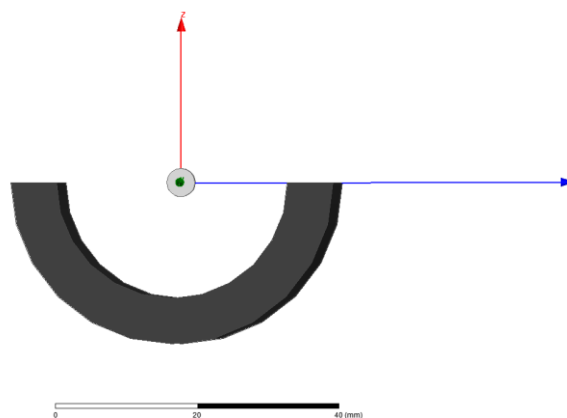


Figura 4.1 Sistema de referencia utilizado para el cálculo de la fuerza de levitación

A partir de esta posición se hará el resto de análisis. En la figura 4.2 se muestra dicha variación.

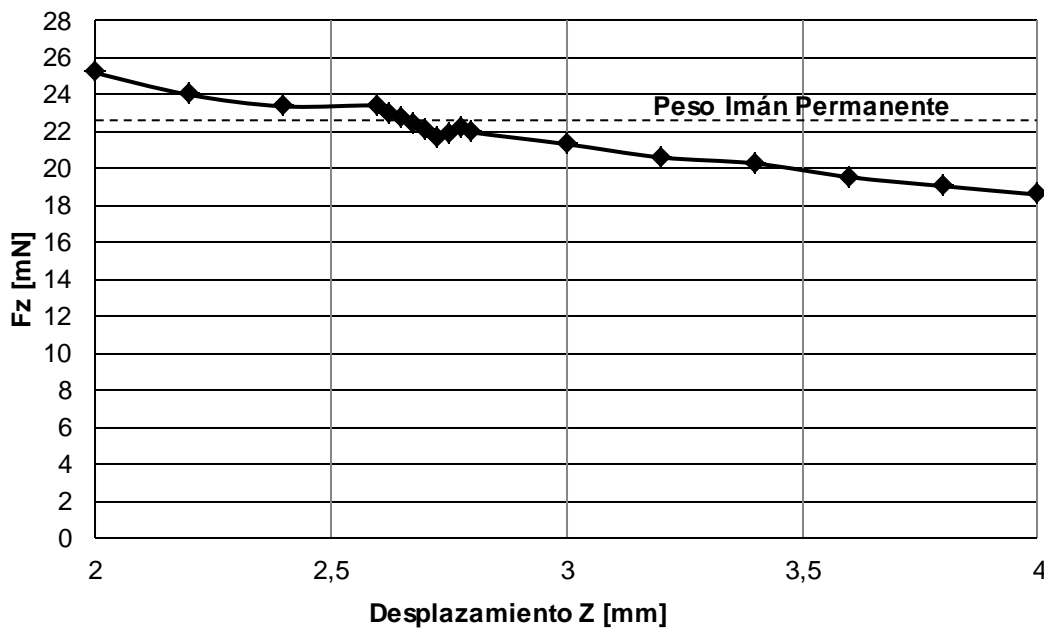


Figura 4.2 Fuerza de levitación dependiendo de la altura del imán permanente

El peso del imán que se ha utilizado durante todo el proyecto es de 22.18 mN. Por tanto, se observa que la fuerza de levitación se iguala con el peso del imán en **2.775 mm** concretamente. Esta posición es muy estable ya que las fuerzas laterales son tales que no permiten desviaciones en la dirección Y, como se verá en la figura 4.19, si esta posición fuese más alta, una pequeña desviación podría descompensar las fuerzas en el imán permanente, y, por tanto, al producirse una desviación, éste perdería la estabilidad y sería repelido.

4.1.2. Desplazamiento Y: Fuerzas y Campo Magnético Tangencial Fuerzas en eje Z y eje Y

Una vez que ya se conoce la posición estable, se va a analizar las fuerzas en los tres ejes cuando se producen desviaciones en la dirección Y. Por supuesto, cada análisis desde este momento se hará partiendo de la posición de levitación de equilibrio. El resultado de esta desviación se muestra en la figura 4.3.

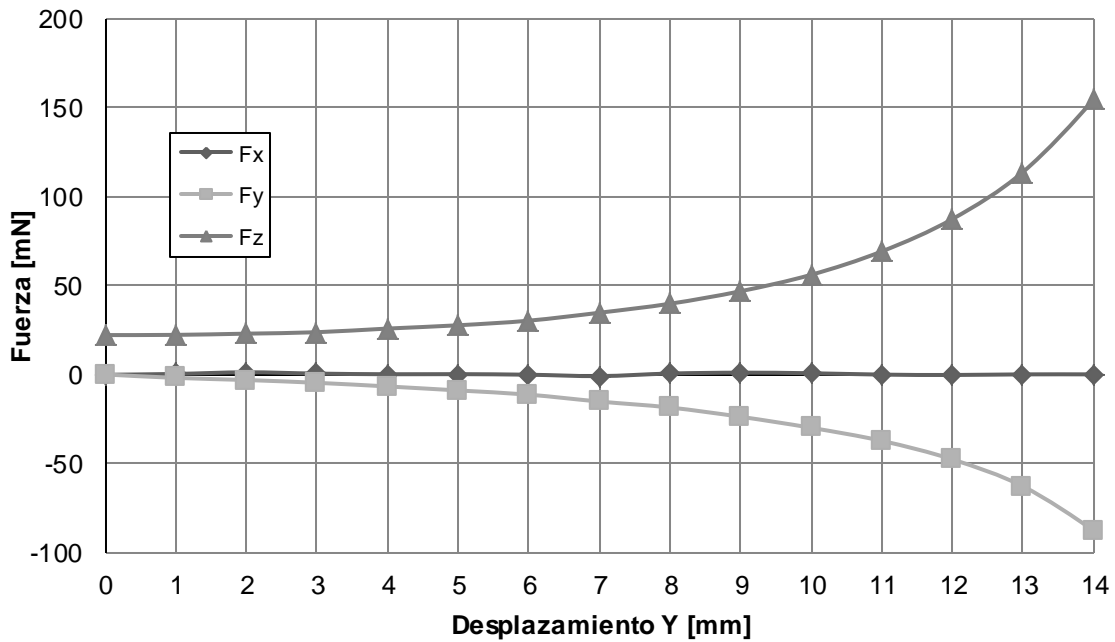


Figura 4.3 Fuerzas en los distintos ejes para desviaciones en el eje Y del imán permanente

La primera **fuerza en el eje X** se mantiene en **0 mN** durante todo el recorrido. Esto es importante conocerlo ya que la ausencia de dicha fuerza permite que la posición del imán sea completamente estable. Esto también es muy positivo ya que permite recolocar el imán en toda la dirección X (dentro del rango de funcionamiento) sin **ninguna resistencia**.

La **fuerza en el eje Y** es nula en la posición de equilibrio y a medida que aumenta la desviación en el eje Y, esta fuerza es negativa. Este es otro punto muy positivo ya que significa que las fuerzas que el superconductor genera tratan de **colocar el imán en su posición de equilibrio de nuevo**, y cuanto mayor es dicha desviación, mayor es también la fuerza recuperadora. En definitiva, que el imán siempre tiende a posicionarse en el centro del superconductor respecto al eje Y.

La fuerza de levitación también aumenta de manera positiva debido a que las fuerzas que el superconductor genera son mayores cuanto más cerca se encuentra el imán permanente. Esto se debe a la intensidad del campo magnético que dicho superconductor recibe por parte del imán.

Campo magnético tangencial

Uno de los factores más importantes que se ha nombrado durante todo el proyecto es conseguir el estado Meissner durante todo el funcionamiento del mecanismo. Para ello, uno de los factores más importantes que hay que comprobar es el **campo magnético tangencial** que el superconductor recibe. A partir de este valor y dependiendo del material superconductor que se utilice, se podrá asegurar un estado Meissner puro o no.

El campo magnético tangencial se define de la siguiente manera:

$$\vec{H}^{tang} = \vec{n}_s \times \vec{H}^{ap} \quad (4.1)$$

Donde:

- n_s es el vector normal a la superficie del superconductor.
- H^{ap} es el campo magnético aplicado generado, en este caso, por el imán permanente.

Esta expresión no viene definida en Ansys Maxwell v15 como tal. Sin embargo, dicho software cuenta con una “calculadora” que permite introducir la expresión 4.1 para su posterior cálculo. La manera en que dicha expresión se introduce con sus variables específicas necesarias para este mecanismo se detallan en el Anexo A.

Para la variación de la posición en Y del imán permanente se ha calculado el campo magnético tangencial para saber el límite de desviación que se podría permitir sin sobrepasar el límite Meissner. En la figura 4.4 se muestra dicha variación.

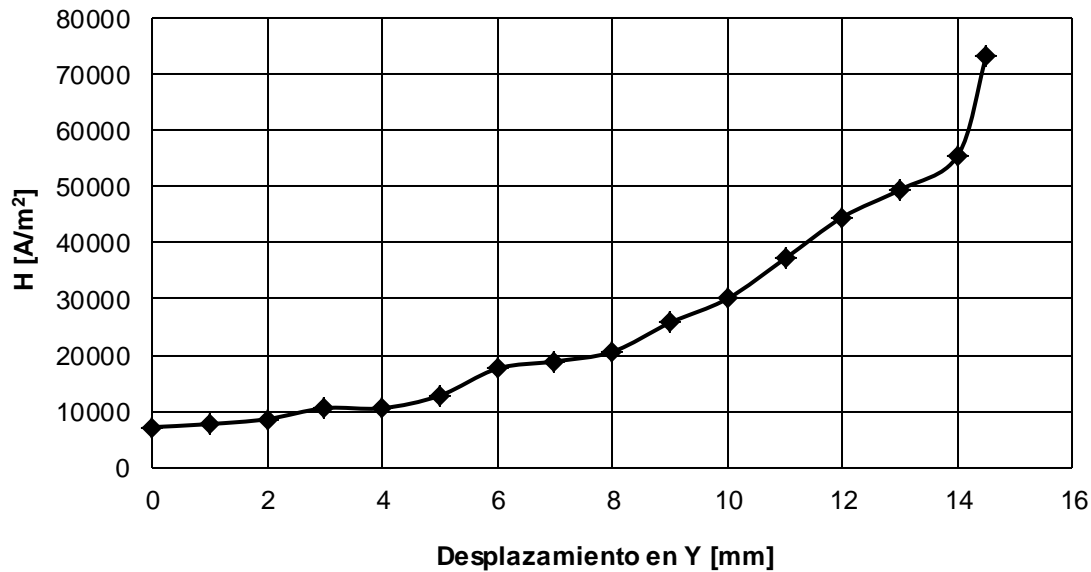


Figura 4.4 Campo magnético tangencial dependiendo de la desviación en el eje Y del imán permanente

Como se observa, el campo magnético tangencial aumenta cuanto más cerca se encuentra el imán permanente del superconductor. Esto se debe a que la intensidad del campo magnético tangencial es mucho mayor cuanto menor es la distancia entre imán-superconductor. El valor obtenido para la **posición inicial** ($Z = 2.775$ mm e $Y = 0$ mm) es de **7140 A/m²**, el cual es bastante alto para la posición de equilibrio y aumenta rápidamente en pocos milímetros.

Este dato fue muy importante para pensar que el **borde recto** del superconductor podría **influir negativamente**. Es lógico pensar que dicho borde actúa similar a una concentración de tensiones en un cambio de sección en un eje, por ejemplo. Es por ello que, en el mecanismo mejorado, se redondea dicho borde y se vuelve a analizar para saber con rigurosidad si dicha idea es correcta.

4.1.3. Desplazamiento X

El último de los análisis que faltan para definir y evaluar el mecanismo es el movimiento del imán permanente a lo largo de la dirección X. Dicho imán parte desde el centro del superconductor hasta más allá de 150 mm, que es el límite de la geometría del superconductor empleado en este proyecto (el sistema de coordenadas es el mismo que el mostrado en la figura 3.3).

Para la variación en esta dirección se ha calculado la fuerza de levitación y la fuerza en la dirección X, así como el par de cabeceo que sufre el imán y el campo magnético tangencial.

Antes de mostrar los resultados obtenidos es muy importante nombrar lo que se ha denominado el “**efecto borde**” o “efecto de alineamiento”. La dirección X es uno de los grados de libertad que tiene nuestro mecanismo y es por ello que puede moverse a lo largo de esta dirección sin encontrar fuerzas que se opongan. Sin embargo, el superconductor no es infinito, sino que tiene una longitud de 300 mm. Es por ello que a medida que se aproxima al final del mismo, o **fin de carrera**, el comportamiento del imán no puede ser el mismo al tender a alinearse con el superconductor. Momentos antes de alcanzar el final se produce el “efecto borde” o “efecto de alineamiento”, donde el **rendimiento del mecanismo disminuye** como se especifica en los resultados que se muestran a continuación. De aquí viene el par de cabeceo que no ha aparecido en ningún otro punto del funcionamiento. En la figura 4.5 se muestra dicho alineamiento que fue estudiado en [34].



Figura 4.5 *Ángulo de equilibrio del imán permanente respecto al superconductor*

Se puede apreciar el alineamiento del imán con la superficie del superconductor cuando dicho imán se aleja de la proyección del superconductor. Esto ocasiona una variación de las fuerzas en las distintas direcciones excepto en la dirección lateral.

Una vez explicado en qué consiste el “efecto borde”, o “efecto de alineamiento” como en se denomina en [34], se pasa a mostrar los resultados obtenidos de los distintos análisis realizados.

Fuerza en eje X

El resultado de la fuerza en la dirección X con la variación de la posición en dicha dirección se muestra en la figura 4.6.

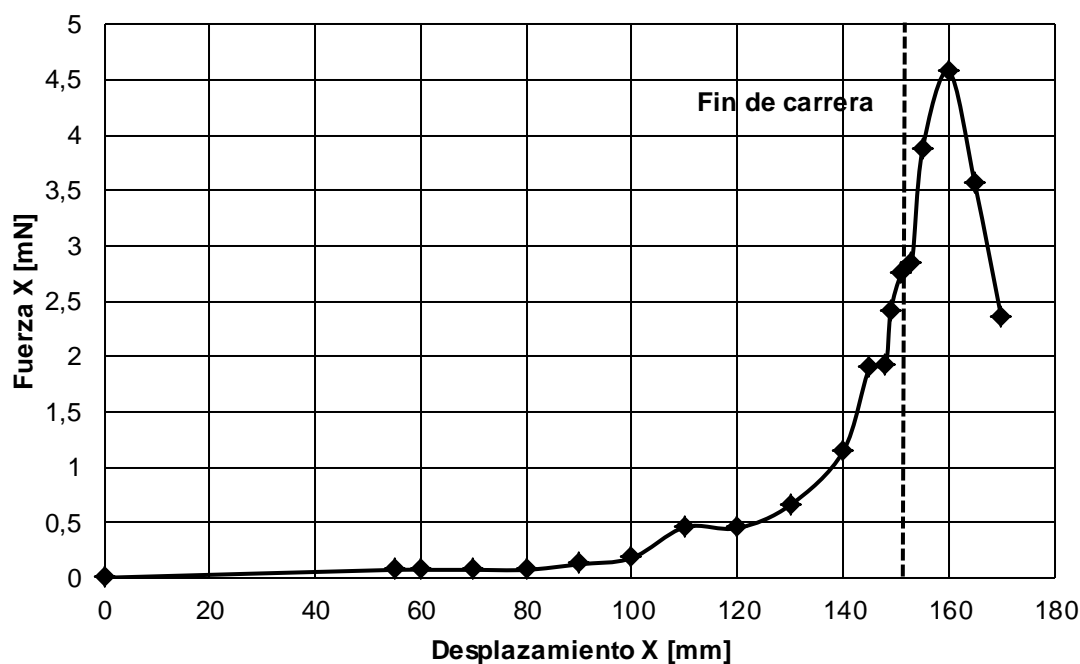


Figura 4.6 Fuerza en X para el desplazamiento axial

La fuerza en X desde la posición inicial hasta 100 mm es prácticamente nula. Sin embargo, se observa como dicha fuerza empieza a aumentar a medida que el imán se acerca al fin de carrera hasta un valor apreciable de **4.57 mN**. Lo primero remarcable es que esta fuerza empieza a aumentar antes de llegar al fin de carrera. Esto se debe a que el imán ya ha empezado a alinearse con el borde del superconductor y, por tanto, la fuerza en X aumenta. Además se observa que la **fuerza máxima** se alcanza más allá del fin de

carrera y es **positiva**, lo que quiere decir que las fuerzas generadas por el superconductor **tienden a expulsar el imán permanente** de su superficie. Este es un dato negativo debido a la inestabilidad que se presenta en este tramo.

Fuerza de levitación

El siguiente análisis está relacionado con la variación de la fuerza de levitación con respecto a la posición en dirección X. En la figura 4.7 se muestran los resultados.

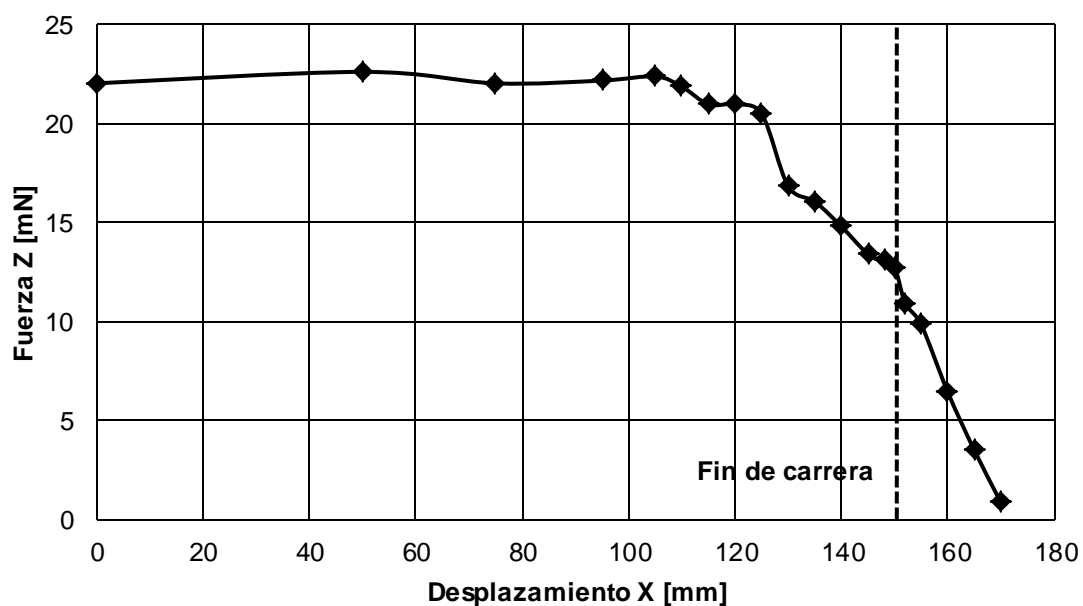


Figura 4.7 Fuerza de levitación para el desplazamiento axial

En esta ocasión se obtiene una disminución de la fuerza de levitación a medida que nos acercamos al final de carrera. Dicha fuerza varía levemente hasta los 100 mm. A partir de este punto empieza a disminuir progresivamente (excepto en 120 mm donde sufre una disminución brusca) y a los 150 mm ya tiene una caída brusca. Sin embargo, se puede observar como justo en el **final de carrera**, dicha disminución es muy leve durante unos milímetros. Esto se debe a que la **cara lateral exterior del superconductor contribuye positivamente** a esta fuerza de levitación. No obstante, dicha contribución no es suficiente y por ello sigue disminuyendo la fuerza.

La mayor contribución a esta fuerza la realiza la parte de superconductor proyectada desde el imán permanente y, después, sus alrededores. Debido a esto, esta fuerza de levitación disminuye tan bruscamente cuando ya ha pasado el final de la carrera.

Par de cabeceo

El siguiente análisis es el par de cabeceo. Este par se corresponderá en cierta manera con la fuerza en X que se ha mostrado en la figura 4.6. Se ha establecido el eje Y positivo como dirección de referencia de este par. Los resultados se muestran en la figura 4.8.

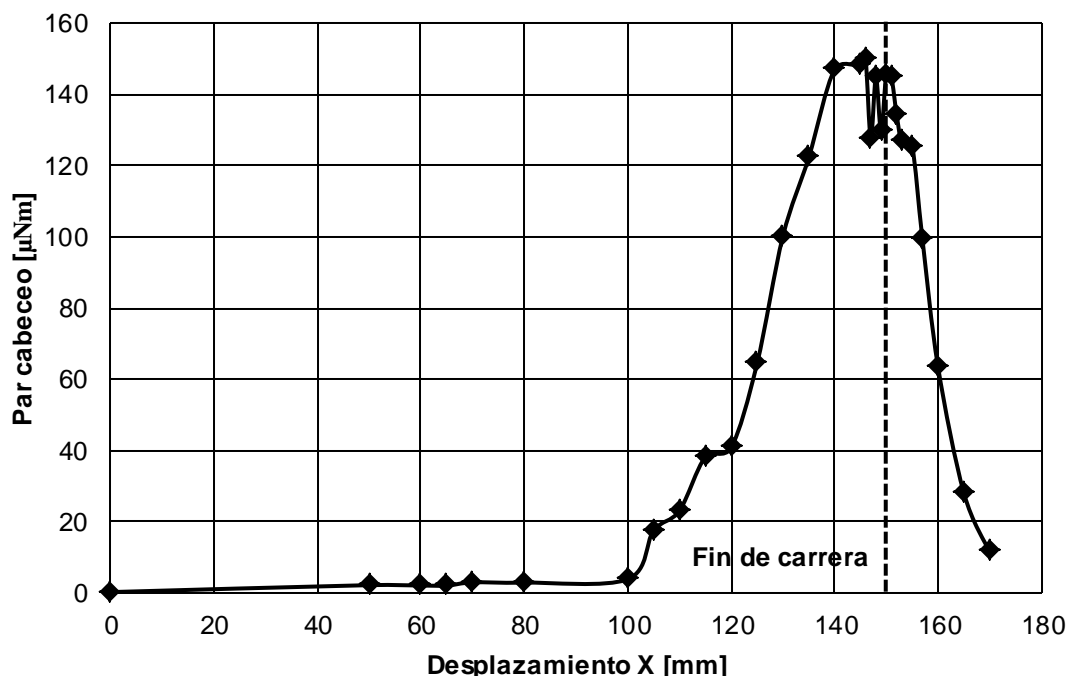


Figura 4.8 Par de cabeceo para el desplazamiento axial

Este parámetro se añade en este momento debido a que su valor cuando la posición de X no varía es nulo. De hecho, su valor es casi 0 Nm hasta una posición de 100 mm. A partir de este punto, dicho par empieza a aumentar hasta un valor máximo de **148.02 μNm** . Es cierto que el orden de magnitud del par es muy pequeño, pero es suficiente para hacer rotar sobre el eje Y al imán permanente para poder alinearse con el superconductor.

Si observamos este resultado con el obtenido en la figura 4.6 perteneciente a la fuerza en el eje X, se aprecia como el par máximo se obtiene

justo antes del final de carrera, a 145 mm para ser precisos, y es en este punto también, el valor de la fuerza en X aumenta bruscamente hasta su valor máximo en 160 mm. Por tanto, la existencia de una **fuerza en el eje X** se explica **debido al par de cabeceo** que sufre el imán permanente como consecuencia del efecto de alineamiento que se produce.

Campo magnético tangencial

Por último, se analiza el campo magnético tangencial que el imán permanente ejerce sobre el superconductor para saber el material adecuado a utilizar.

En la figura 4.9 se muestran los resultados cuando el imán se desplaza en la dirección X y sobrepasa el final de carrera.

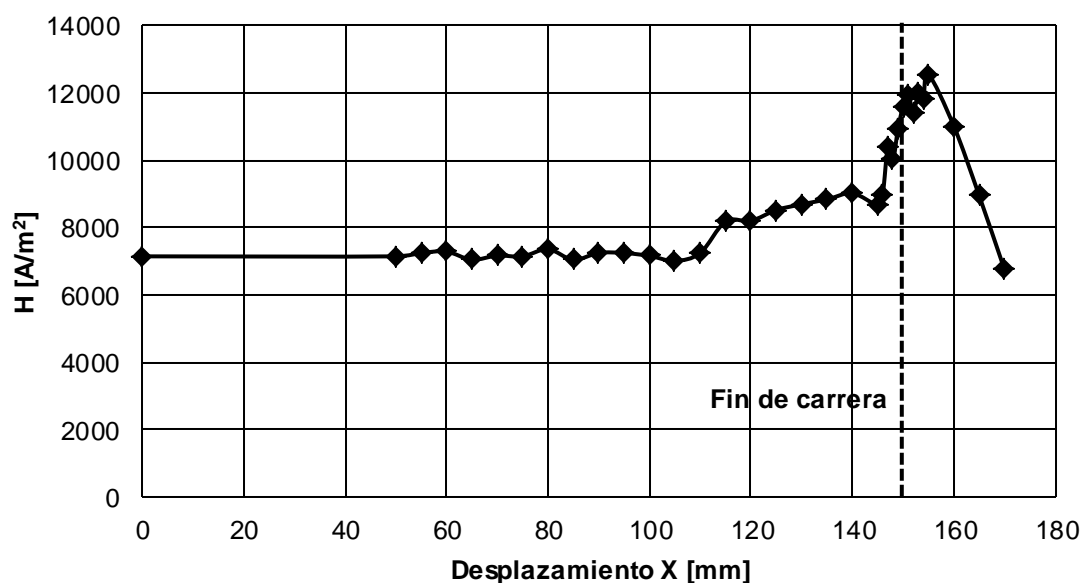


Figura 4.9 Campo magnético tangencial para el desplazamiento axial

En este caso las variaciones empiezan a partir de 60 mm. No obstante, aparece una meseta a los 110 mm y el cambio brusco se produce milímetros antes del final de carrera, donde se obtiene un campo magnético tangencial máximo de **12537.53 A/m²**. A partir de 155 mm, este campo disminuye drásticamente en pocos milímetros debido a que el imán permanente ya no está sobre el superconductor por lo que el campo magnético que proyecta sobre éste no tiene la misma intensidad.

En la figura 4.10 se muestra el campo magnético tangencial que produce el imán permanente a su paso por el final de carrera.

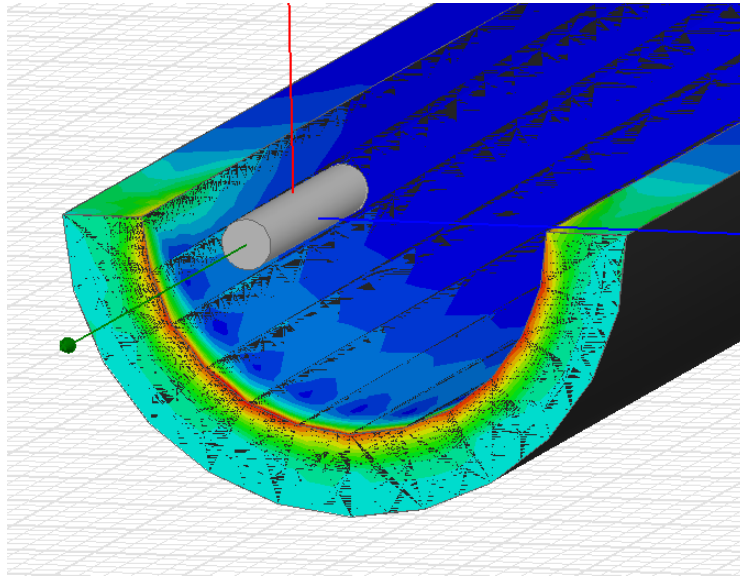


Figura 4.10 Campo magnético tangencial en el borde del superconductor

En todos los análisis anteriores hay que resaltar los **cambios tan bruscos** que se producen en **pocos milímetros** o comportamientos que no se esperarían. Por ejemplo, en la figura 4.9 donde se muestra el campo magnético tangencial, dicho campo en el final de carrera varía entre varios valores en pocos milímetros. También sucede en la fuerza de levitación o en la fuerza en X, donde de un milímetro a otro la fuerza se mantiene constante o su variación es despreciable. Todo esto se debe a la **singularidad del borde recto** que presenta este mecanismo y que ya se apreció con el resultado de fuerzas cuando se varía la posición en la dirección Y.

4.2. MECANISMO MEJORADO

Como se ha dicho al final del apartado anterior, la principal causa de obtener datos un poco irregulares se debe a la singularidad de los bordes rectos con los que cuenta el mecanismo original. Estos bordes (tanto en los laterales del superconductor como en el final de carrera) actúan como singularidades donde la malla computacional es difícil de ajustar al no ser una

superficie como tal, y por ello los resultados que se obtiene pueden variar mucho en pocos milímetros.

Esto también es un problema para la continuidad en el movimiento del imán permanente así como para poder asegurar un estado Meissner durante su funcionamiento. Debido a que tenemos que asegurar un estado Meissner puro durante un gran rango de desplazamiento para obtener un movimiento no histerético, se decide **redondear los bordes** del superconductor para ver si el comportamiento mejora como se prevé. Este mecanismo mejorado se muestra en la figura 4.11.

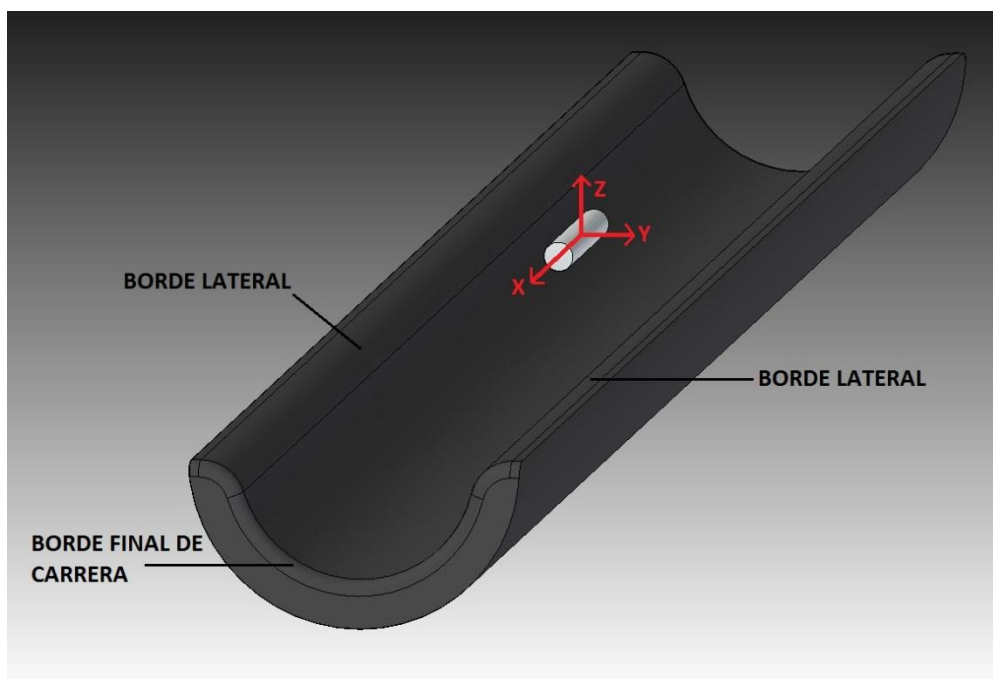


Figura 4.11 *Mecanismo mejorado con el sistema de referencia*

Igual que en el mecanismo original, lo primero que hay que comprobar es la posición estable de levitación en la dirección Z. Una vez conseguida dicha posición y gracias a resultados anteriores, se sabe que también será estable en la dirección Y. El sistema de coordenadas utilizado durante todos los análisis de este mecanismo es el mismo que para el mecanismo original, es decir, igual que el mostrado en la figura 4.11, excepto para la fuerza de levitación.

4.2.1. *Desplazamiento Z*

Por tanto, en la figura 4.12 se muestra la variación de la posición Z para saber la posición de levitación estable.

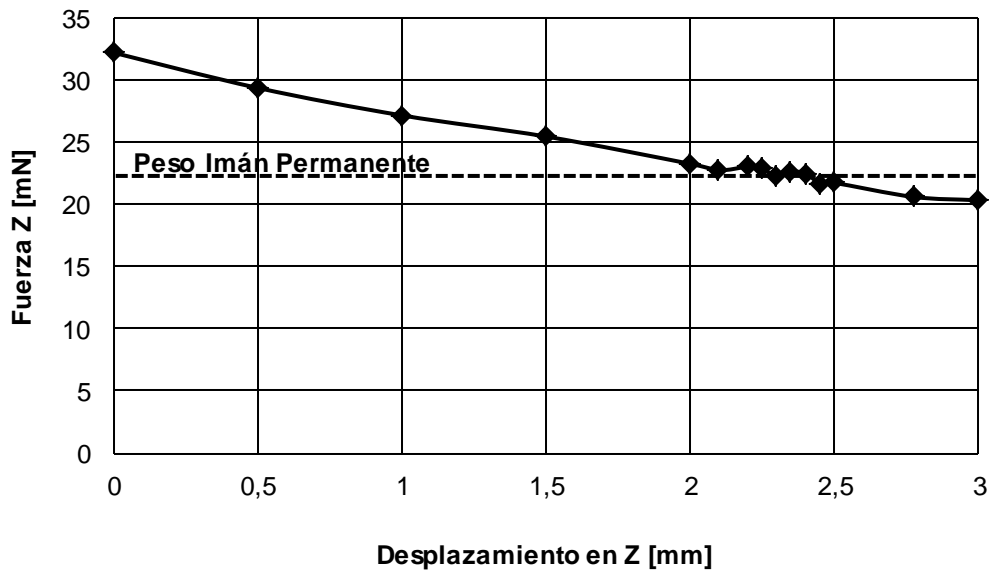


Figura 4.12 Fuerza de levitación con variación en la altura

En este caso se obtiene una posición estable de **2.3 mm**, algo más baja que para el modelo original. Por tanto, la posición es aún más estable aunque no se aprecia con resultados llamativos.

4.2.2. Desplazamiento Y: Fuerzas y Campo Magnético Tangencial

Fuerzas en eje Z y eje Y

Ahora se procede a analizar las fuerzas tanto en Y como en Z cuando se produce una desviación lateral, es decir, en la dirección Y. En este caso no se estudia la **fuerza en X** con dicha variación ya que, igual que pasó en el mecanismo original, su valor será de **0 N** al estar centrado en el superconductor con respecto al eje X. En la figura 4.13 se muestran dichas fuerzas.

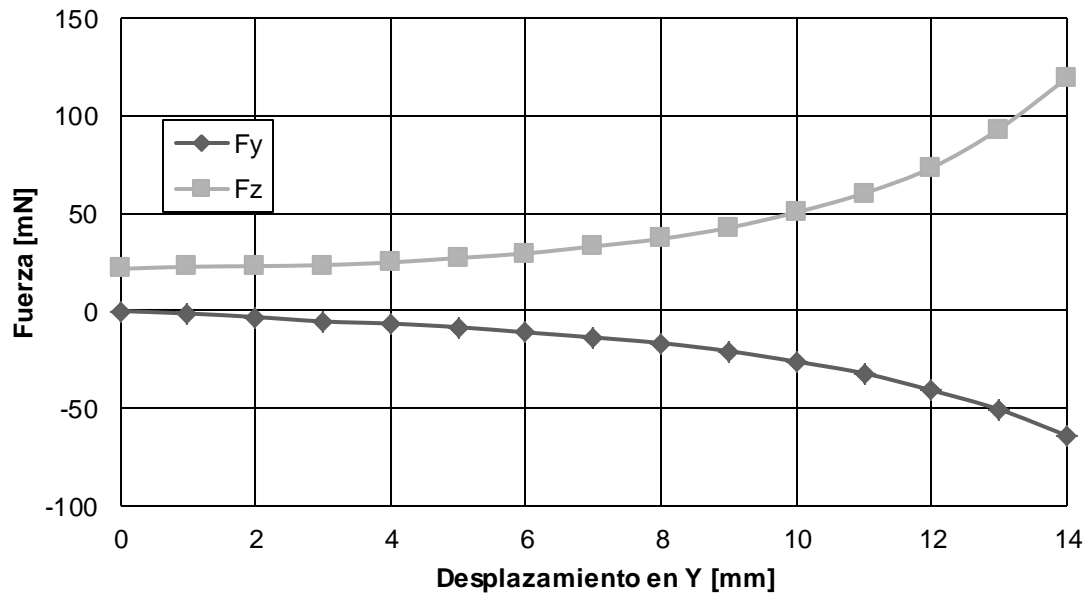


Figura 4.13 Fuerzas para desviación en la dirección Y

El comportamiento es similar que en el mecanismo original. En el caso de producirse una desviación lateral, las fuerzas laterales tienden a equilibrar al imán permanente otra vez al centro debido a la repulsión de dichas fuerzas. En cuanto a la fuerza de levitación, aumenta a medida que nos acercamos al superconductor ya que la intensidad del campo magnético que se proyecta sobre este es mucho mayor y, por tanto, las fuerzas que éste genera.

Campo magnético tangencial

Igual que en el mecanismo anterior, interesa ver el máximo campo magnético tangencial que se alcanza debido a la desviación lateral. Sin embargo en este caso el borde está redondeado y se esperan mejores resultados. Dichos resultados se muestran en la figura 4.14.

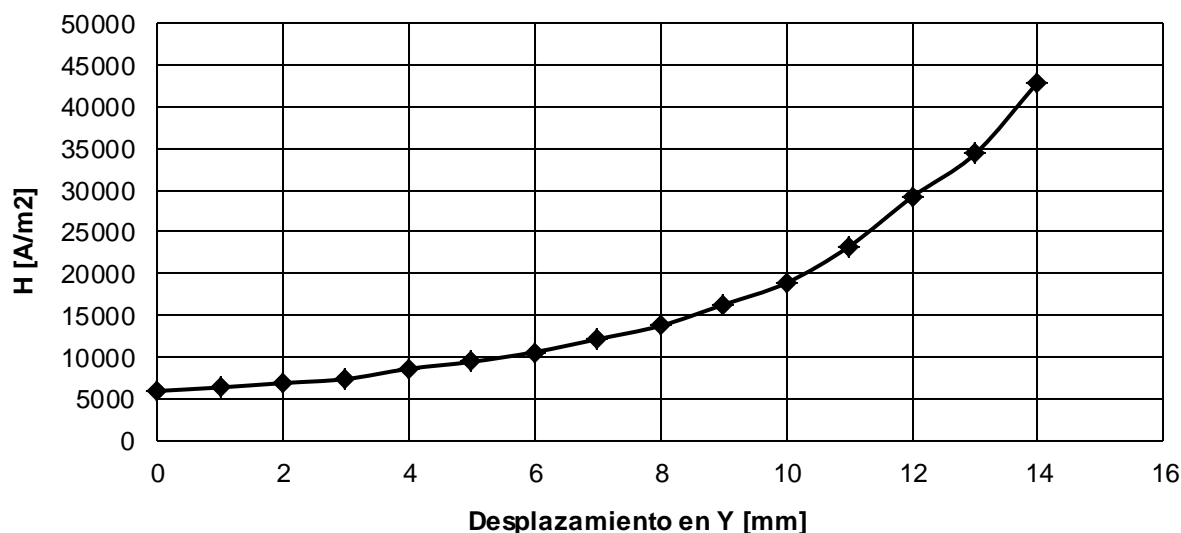


Figura 4.14 Campo magnético tangencial dependiendo de la desviación en la dirección Y

En este mecanismo se inicia con un mínimo de **5888.33 A/m²** y no es hasta una desviación de 6 mm cuando se alcanzan los 10000 A/m². Además, dicho campo aumenta de una manera progresiva sin encontrar saltos bruscos entre distancias pequeñas, lo que permite, en caso de desviación, no sobrepasar (dependiendo del material superconductor utilizado siempre) el estado Meissner puro para los primeros milímetros de desviación, hasta que las fuerzas de repulsión lleven a su posición inicial al imán permanente.

Como se realizó anteriormente, ahora se pasa a analizar los resultados obtenidos cuando el imán permanente se desliza por el superconductor, es decir, cuando se mueve a lo largo del eje X hasta más allá del final de carrera. Se analizan las fuerzas, par de cabeceo y máximo campo magnético tangencial para ver si realmente existe una mejora apreciable en este modelo.

Fuerza en eje X

Primeramente se analiza la fuerza en el eje X para ver como varía a cuando se acerca al final de carrera. El resultado se muestra en la figura 4.15.

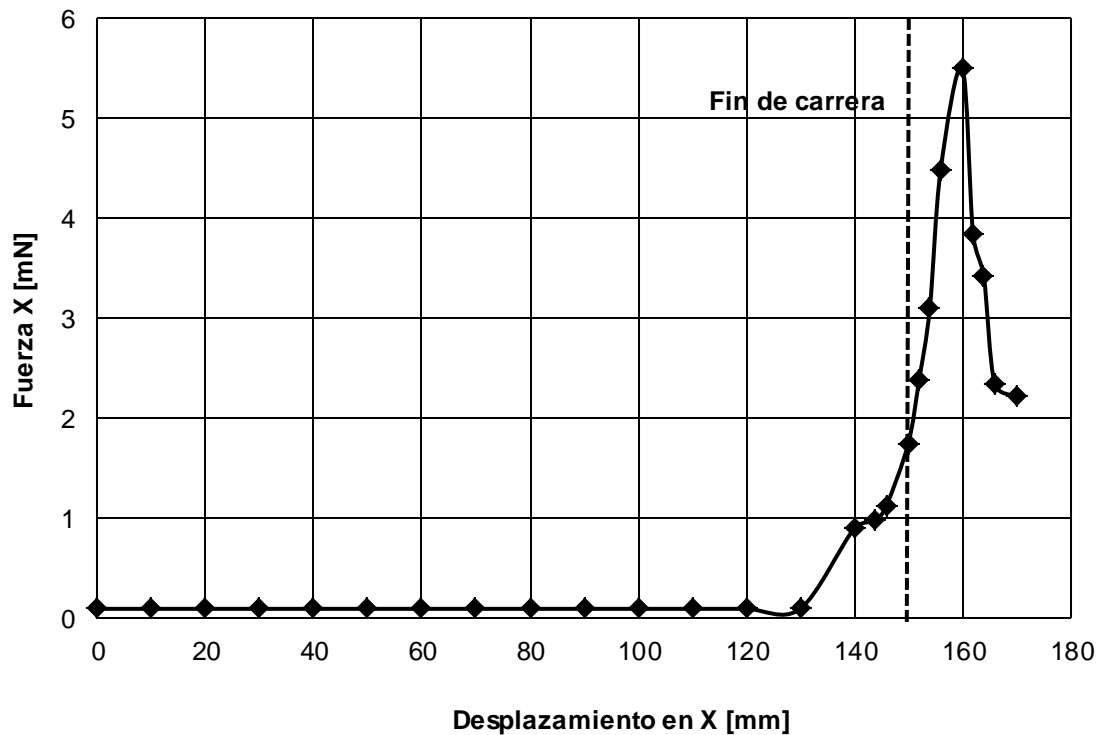


Figura 4.15 Fuerza X para desplazamiento en dirección X

Se observa un **rango de amplitud** de unos **120 mm** antes de que la fuerza en X empiece a repeler al imán hacia el exterior. Su máximo valor se alcanza pasado el final de carrera, a 160 mm con un valor de **5.51 mN**. Esto ocurre debido a la contribución de la cara lateral exterior del superconductor, que también ayuda a repeler dicho imán. Por tanto, hasta un máximo de 120 mm se podría desplazar el imán sin preocupación por la fuerza en este eje.

Fuerza de levitación

Ahora se pasa a analizar la fuerza de levitación que, siguiendo un comportamiento similar al mecanismo original, empezará a perder fuerza de levitación una vez pasado el final de carrera. Dichos resultados se muestran en la figura 4.16.

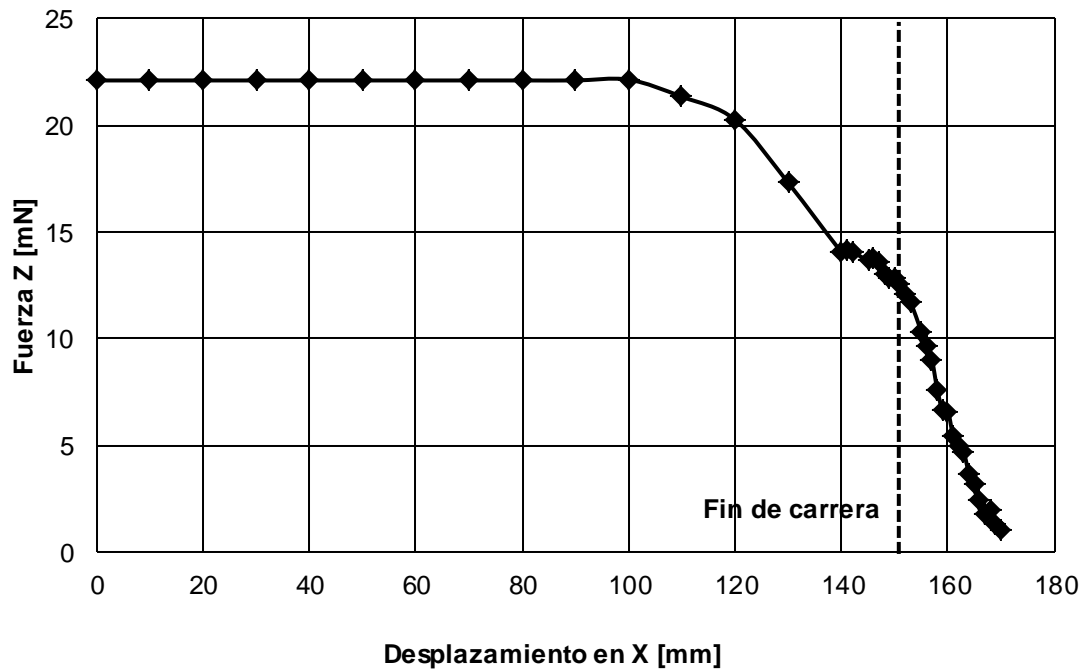


Figura 4.16 Fuerza de levitación para desplazamiento en eje X

Las previsiones se cumplen y se tiene un **rango de 100 mm** de pleno rendimiento del mecanismo. A partir de esta distancia, la fuerza de repulsión por parte del superconductor empieza a decaer progresivamente. En la posición de final de carrera (150 mm) dicha fuerza decae muy levemente debido a que la cara externa lateral (la cara que forma la sección del superconductor) contribuye, aunque poco, a aumentar la fuerza de levitación. Sin embargo, dicha contribución no es suficiente como para conseguir elevar el imán hasta su posición de equilibrio, y más allá del final de carrera, la fuerza de levitación decae rápidamente.

Par de cabeceo

El siguiente análisis llevado a cabo es el par de cabeceo que sufre el imán permanente a su paso por el final de carrera. Los resultados son mostrados en la figura 4.17.

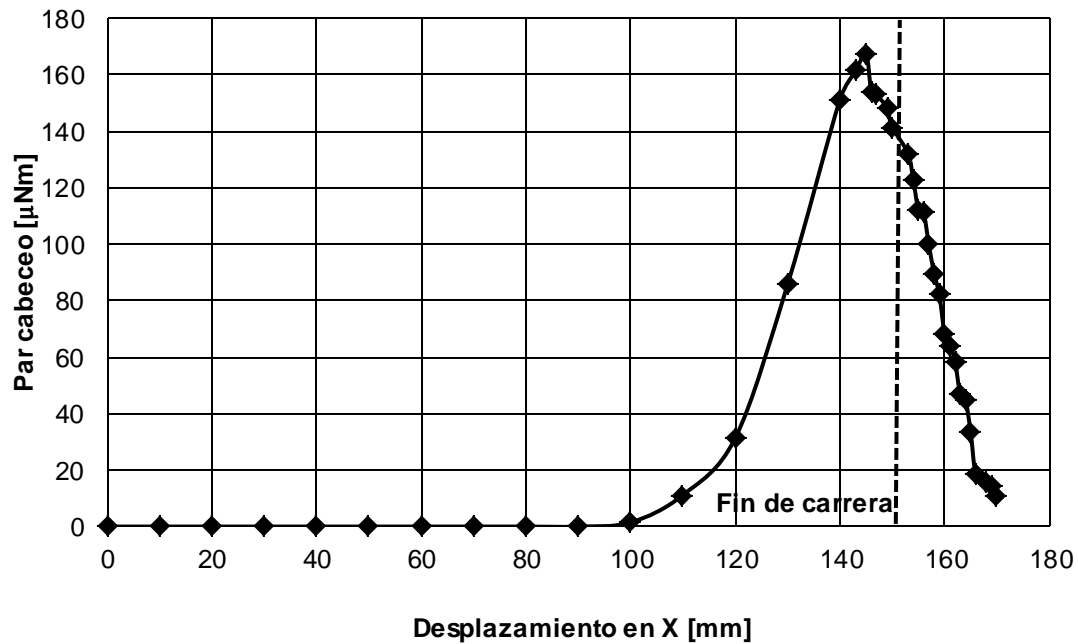


Figura 4.17 Par de cabeceo para el desplazamiento en eje X

En este caso también se tiene un rango de rendimiento máximo hasta los 100 mm. A partir de dicha posición, este par empieza a aumentar desestabilizando el imán y contribuyendo a que la fuerza en X también aumente rápidamente como se mostró en la figura 4.15. El máximo par alcanzado es de **167.35 μNm** unos milímetros antes del final de carrera. A partir de que el imán empieza a alejarse del superconductor, dicho imán no tiene más superficie con la que alinearse y, por tanto, el par disminuye hasta un valor nulo otra vez.

Campo magnético tangencial

Finalmente, y sabiendo que se obtiene **pleno rendimiento del mecanismo hasta una distancia de 100 mm**, es necesario analizar el máximo campo magnético tangencial que se obtiene a lo largo del desplazamiento en el eje X para saber si el estado Meissner se mantiene, al menos, durante ese rango. Los resultados se muestran en la figura 4.18.

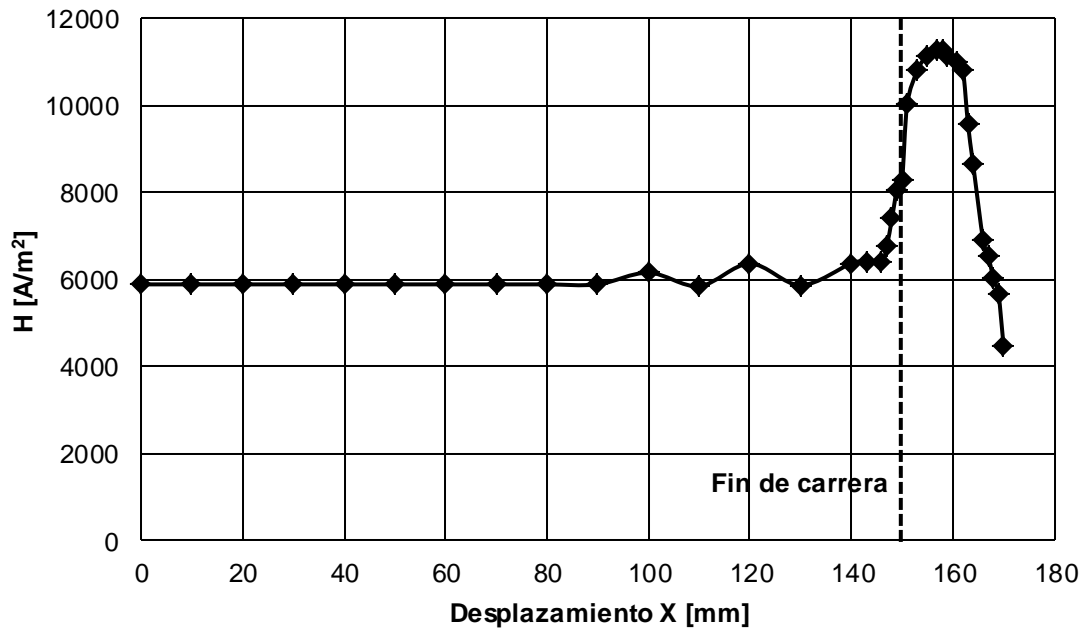


Figura 4.18 Campo magnético tangencial para el desplazamiento en el eje X

Se puede apreciar cómo se mantiene un valor de 5888.33 A/m^2 durante gran parte del desplazamiento. A partir de 100 mm otra vez empieza a variar el campo hasta obtener un **máximo de 11261 A/m^2** a casi 160 mm, un valor bastante alto para que un superconductor convencional pueda trabajar en estado Meissner. Sin embargo no es importante dicho valor máximo debido a que en esa zona, el mecanismo no va a trabajar.

4.3. COMPARACIÓN ENTRE AMBOS MECANISMOS

En este apartado se van a analizar todos los datos obtenidos durante el proyecto para poder comparar ambos mecanismos. De esta manera se dan razones por las cuales el mecanismo mejorado sería el idóneo para diversas aplicaciones como las que ya se nombraron en la introducción (posicionamiento preciso como en interferometría [2],[3], por ejemplo).

Primeramente se analiza la posición de equilibrio de ambos mecanismos ya que se ha visto que no son iguales. No obstante son muy parecidas debido a que la geometría es prácticamente idéntica salvo el pequeño redondeo en los bordes laterales. Las posiciones que se obtenían para el mecanismo original y para el mejorados son 2.775 mm y 2.3 mm, respectivamente. La posición del

mecanismo mejorado es más baja por lo que será más estable. Para poder dar fuerza a esta afirmación, se ha hecho un análisis del imán a una posición de levitación de 2 mm y otro análisis en una posición de 15 mm. La posición del imán con vectores de fuerzas que sufre en imán se muestra en la figura 4.19.

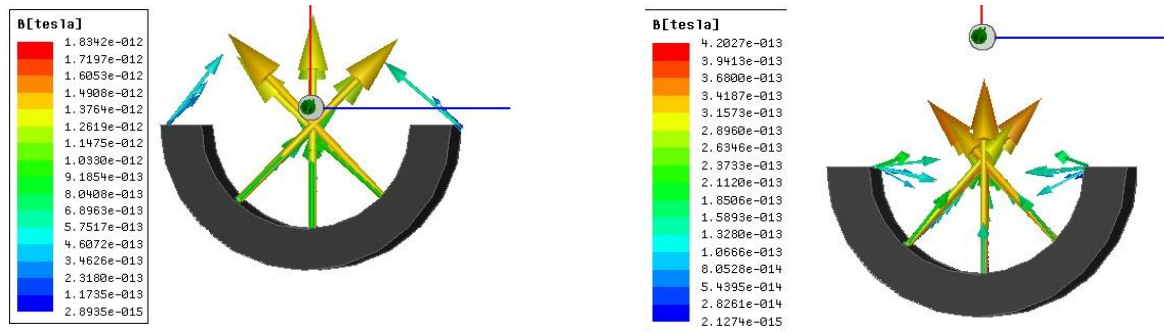


Figura 4.19 Fuerzas vectoriales que actúan sobre el imán permanente

Se observa cómo, cuanto **mayor es la posición de levitación**, las fuerzas generadas por el superconductor contribuyen en gran parte a la **levitación del imán pero no a auto-alinearlo en el centro**, por lo que podría ser repelido. Sin embargo, en el caso donde esta posición es menor, aparece una gran contribución de fuerzas en el eje Y que consiguen mantener el imán permanente en el centro del superconductor. Es cierto que la diferencia entre ambos modelos no es significativa y, por tanto, no habrá un caso donde se desestabilice el imán permanente.

Otro detalle importante a remarcar en cuanto a esta posición de levitación tiene que ver con el campo magnético tangencial máximo que aparecen en ambos casos. Lo normal es pensar que, cuanto menor es la altura de equilibrio a la que se encuentra el imán, mayor tiene que ser el campo magnético tangencial debido a que la intensidad de **campo magnético** que proyecta el imán sobre el superconductor es mucho mayor. No obstante, entre estos dos mecanismos **afecta mucho más el borde lateral** que se redondea en el mecanismo mejorado, **que la propia posición de levitación**. Es por ello que para el mecanismo mejorado, estando a 2.3 mm en el eje Z, el máximo campo magnético tangencial es de 5888 A/m^2 , mientras que para el mecanismo original, estando a 2.775 mm en el eje Z, dicho campo magnético

es de 7140 A/m^2 . En la figura 4.20 se muestran ambos modelos en su posición de equilibrio y con el campo magnético tangencial generado.

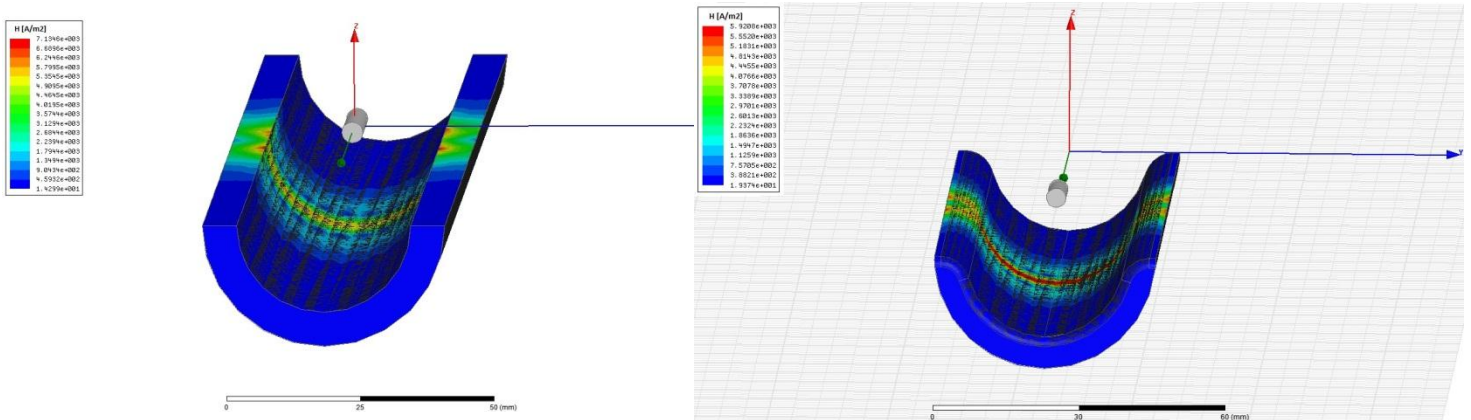


Figura 4.20 Campo magnético tangencial para el mecanismo original (izquierda) y mecanismo mejorado (derecha)

En la figura anterior se aprecia cómo, para el mecanismo original, el mayor campo aparece en el borde recto. Para el mecanismo mejorado eso ya no es un problema y se concentra justo debajo del imán, que es donde más intensidad de campo recibe el superconductor.

La siguiente comparación se va a hacer teniendo en cuenta la desviación que puede sufrir el imán permanente. En este aspecto no hay mucho que destacar ya que ambos comportamientos son similares y sólo varía el valor cuantitativo, siendo mayor tanto la fuerza de levitación como la fuerza en el eje Y en el mecanismo original, cuando la desviación es máxima. Al ser mayor la fuerza del eje Y en el **mecanismo original**, si en algún momento el imán permanente sufriese una desviación, tardaría más en volver a la situación de “reposo” en el centro del superconductor ya que el **movimiento transitorio** que se produciría sería **mayor**. Aun así, la diferencia entre ambos no es muy grande ya que en este tipo de mecanismo, las fuerzas estabilizan rápidamente al imán, o lo repelerían.

Es importante recordar que un funcionamiento normal del mecanismo está en el centro del superconductor, abarcando un rango de 200 mm de los 300 mm disponibles. En este caso, el modelo mejorado ofrece mayores

ventajas y más garantías de poder conseguir de manera continua un estado Meissner puro al ser menor el campo magnético tangencial.

No obstante, también puede ser muy útil comparar ambos mecanismos cuando ambos se acercan al final de carrera y, por tanto, disminuye su eficacia. De esta manera también se puede elegir el mejor mecanismo y saber qué ocurrirá en el caso de que en algún momento de su funcionamiento, el mecanismo fuese más allá del rango de 200 mm especificado anteriormente.

En las figuras 4.6 y 4.15 se ven las fuerzas en X para el mecanismo original y el mecanismo mejorado cuando se desplazan axialmente, respectivamente.

Lo más llamativo al observar ambas gráficas es la continuidad que se sigue en el mecanismo mejorado mientras que para el mecanismo original hay saltos hasta llegar al valor máximo. Estos **incrementos bruscos** se deben, como ya se ha nombrado con anterioridad, a la singularidad que se presenta en el **borde recto**. En ambos casos la fuerza es de repulsión aunque el máximo valor se encuentra para el mecanismo mejorado, con un pico de 5.51 mN frente a los 4.57 mN del mecanismo original. Sin embargo, en régimen normal no se llega hasta dicha posición por lo que no es un problema realmente el valor máximo.

Las fuerzas de levitación para el mecanismo original y el mecanismo mejorado se muestran en las figuras 4.7 y 4.16, respectivamente.

A simple vista tienen el mismo comportamiento, aunque para el mecanismo original se observa como dicha fuerza empieza a variar antes de los 100 mm y a partir de dicho rango, ésta empieza a disminuir por tramos. En un primer tramo, desde los 100 mm hasta los 130 mm, dicho descenso es muy leve. Sin embargo, a partir de ese punto, se produce un descenso muy pronunciado en pocos milímetros manteniéndose un poco justo en el final de carrera (150 mm) debido a la pequeña contribución por parte de la cara lateral externa (ver figura 4.21).

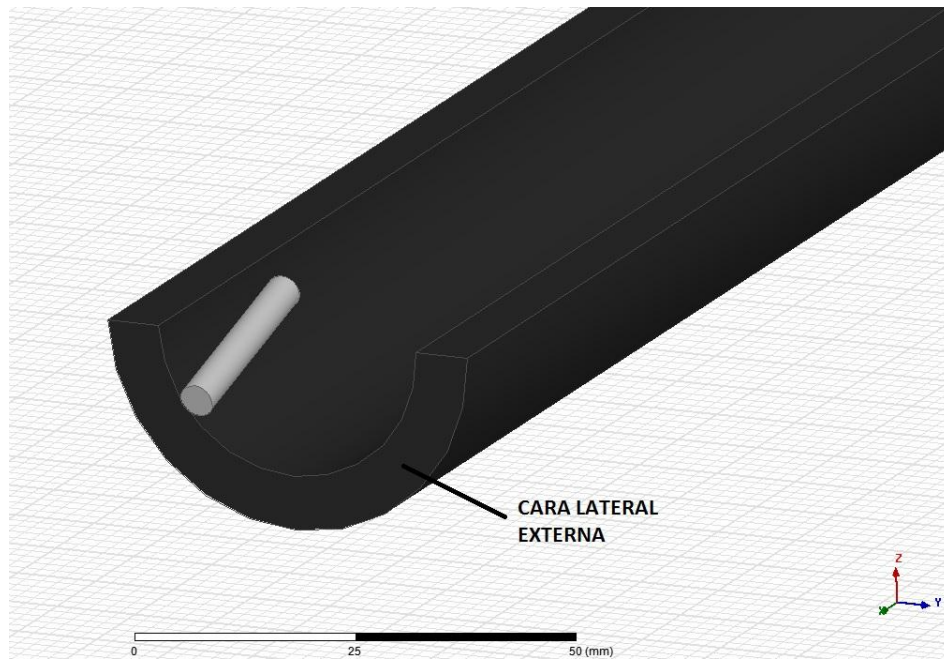


Figura 4.21 Contribución de la cara lateral externa del superconductor

Estos saltos se deben, otra vez, a la singularidad del borde recto. Observando el mecanismo mejorado, se ve como la disminución de la fuerza de levitación se produce más constante, incrementándose a partir de 120 mm. Para este modelo también se observa un pequeño tramo, al final de carrera, donde el descenso es leve debido a la contribución del borde redondeado. Sin embargo no es tan pronunciado como para el mecanismo original. En este análisis también demuestra que el rango más amplio de desplazamiento sin alterar las condiciones de trabajo se encuentra en el mecanismo mejorado. Además, en el caso de sufrir un desplazamiento hasta tales posiciones, el mecanismo mejorado podría revertir la solución debido a su caída de la fuerza más constante, mientras que para el mecanismo original sería más complicado. Si comparamos la fuerza en X con la fuerza de levitación de cada modelo, se observa como en el tramo donde la cara lateral externa actúa, ambas fuerzas aumentan su valor rápidamente en el caso de la fuerza en X y contribuyen a la levitación en el caso de la fuerza en Z.

Dicho comportamiento en el final de carrera también aparece para el mecanismo original, aunque de una manera aún más pronunciada como se ha comentado anteriormente.

También se ha comprobado que, cuando el imán permanente se acerca al final de carrera, el borde contribuye a que el imán permanente se alinee con él y, por tanto, sufra un par de cabeceo. Los resultados para el par de cabeceo para el mecanismo original y el mecanismo mejorado se muestran en las figuras 4.8 y 4.17, respectivamente.

En ambos mecanismos, el par de cabeceo máximo se obtiene justo antes del final de carrera, momento en el que el imán tiende a alinearse tanto con la cara exterior como con la cara curva perpendicular del superconductor. Es por esto que, una vez pasado dicho tramo, el par disminuye debido a que sólo tiende a alinearse con la cara exterior y a la vez, sigue alejándose del superconductor. Centrando la atención en las diferencias entre ambos mecanismos, lo primero que resalta es una vez más el efecto del borde recto del mecanismo original. Se puede observar como el par de cabeceo no muestra valores progresivos, sino que se vuelven a presentar tramos donde aumenta en un milímetro y acto seguido se mantiene casi constante. Una vez pasado un tramo de 120 mm, dicho par aumenta muy rápidamente hasta alcanzar su valor máximo de 148.02 μNm . Además, este borde tampoco permite un mallado preciso de esa zona en concreto, por lo que los resultados obtenidos cuando el imán permanente se encuentra alrededor del final de carrera varían entre valores lejanos unos de otros. En la figura 4.22 se muestra una imagen ampliada de los resultados justo en la zona del final de carrera para el mecanismo original.

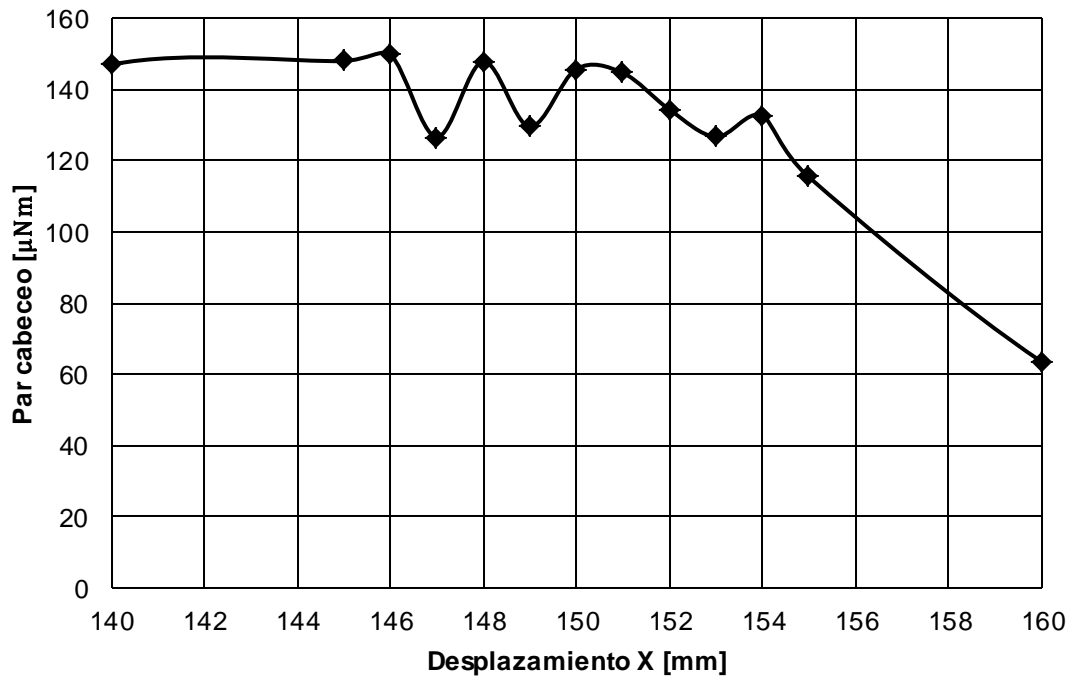


Figura 4.22 Variaciones del par de cabeceo en el mecanismo original al final de carrera debido al borde recto

En cuanto al mecanismo mejorado se observa cómo el imán permanente se alinea con ambas superficies del superconductor de manera más progresiva hasta su máximo valor de 167.38 μNm . Este valor es mayor que para el mecanismo original debido a la posibilidad de poder alinearse de manera progresiva hasta alcanzar el punto óptimo de alineamiento. Esto es gracias al redondeo del borde. Debido a que este **par es mayor**, implica que la **fuerza en X también es mayor** para el mecanismo mejorado, como se ha comentado con anterioridad. Además, la fuerza de levitación en el momento de máximo par es menor para el mecanismo mejorado debido, precisamente, a la **mayor contribución que las fuerzas de repulsión del superconductor hacen en la dirección X que en la dirección Z** (ver figura 4.23).

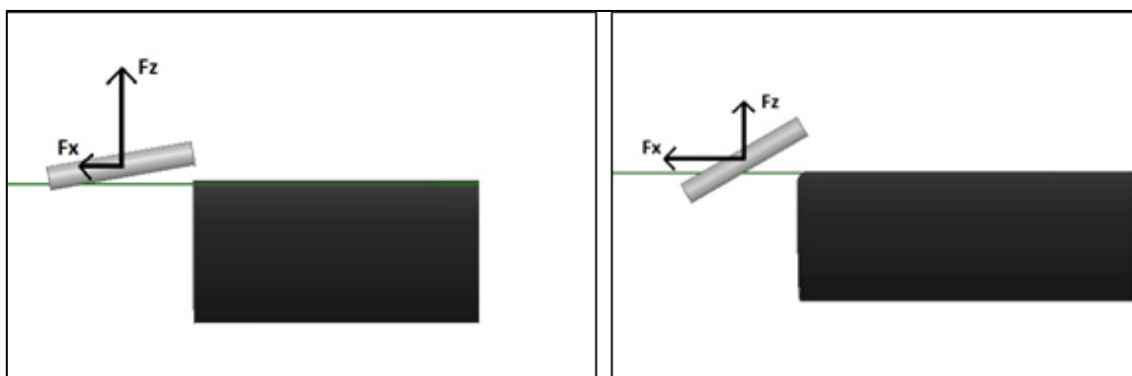


Figura 4.23 Fuerzas que actúan sobre el imán al final de carrera para el mecanismo original (izquierda) y mecanismo mejorado (derecha)

La última comparación de ambos modelos tiene que ver con el máximo campo magnético tangencial alcanzado y que, realmente, permite decantarse por un mecanismo u otro.

Una buena elección aquí permite o no conseguir un estado Meissner completo durante todo el funcionamiento y, de esta manera, conseguir un **cojínete no histerético**, el **objetivo real** de este proyecto.

Los resultados de dicho campo para el mecanismo original y el mecanismo mejorado se muestran en las figura 4.9 y 4.18, respectivamente.

En este caso hay que resaltar una similitud muy apreciable en ambos mecanismos, y es el rango de desplazamiento en el que el campo magnético se mantiene constante. Para ambos mecanismos, dicho rango es de 100 mm, mientras que para los otros análisis, el rango de desplazamiento sin tener variación significativa era menor para el mecanismo original que para el mecanismo mejorado. No obstante, a partir de dicha posición, el campo magnético tangencial para el mecanismo original tiene un aumento apreciable, primeramente en un tramo de 30 mm, y después en un tramo de 10 mm donde se consigue el máximo campo magnético tangencial de 12537.5 A/m^2 . Para el mecanismo mejorado, el aumento brusco de dicho campo se produce a los 140 mm y a los 160 mm ya vuelve a disminuir. Para este mecanismo, el máximo campo magnético tangencial es de 11261.02 A/m^2 . Aquí sí se nota una diferencia cuantitativa entre ambos modelos, y no sólo por el valor máximo, sino por los tramos donde uno y otro aumentan el campo magnético máximo.

5. MATERIALES

SUPERCONDUCTORES

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se van a mostrar los materiales superconductores más típicos hoy en día y, sobre todo, se van a mostrar los límites para el estado Meissner puro de cada uno de ellos. Lo más importante es esto último, al ser de vital importancia para garantizar el objetivo de este proyecto (estado Meissner puro para evitar histéresis en el mecanismo), aunque también será muy importante observar sus **temperaturas críticas**, ya que mientras **mayores** sean, **menor trabajo** se necesitará para que estén en estado superconductor.

Como este tipo de mecanismo está pensado para trabajar en un **entorno criogénico**, las temperaturas que se encuentran dentro del criostato donde esto se montaría serán alrededor de la temperatura de fusión del **nitrógeno líquido** (77 K) o incluso más bajas en el caso de utilizar otro refrigerante, temperaturas más que suficientes comparadas con la temperatura crítica de los materiales superconductores más comunes como se verá a continuación. En la figura 5.1 se muestra un tipo de criostato que se utiliza actualmente en la industria.



Figura 5.1 *Criostato esférico utilizado en la industria*

5.2. YBaCuO

En este apartado se habla específicamente del YBaCuO al ser el material más común hoy en día para aplicaciones industriales como prototipos de MAGLEV Train o cojinetes superconductores [39], [40].

El **YBaCuO**, cuya fórmula química es $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, es un material cerámico superconductor. Se clasifica, atendiendo al capítulo 2, de la siguiente manera:

- Según la temperatura crítica: Superconductor de **alta temperatura**.
- Según el comportamiento físico: Superconductor de **tipo II**.
- Según la teoría que lo explica: Superconductor **exótico**.

La estructura cristalina de este material se muestra en la figura 5.2.

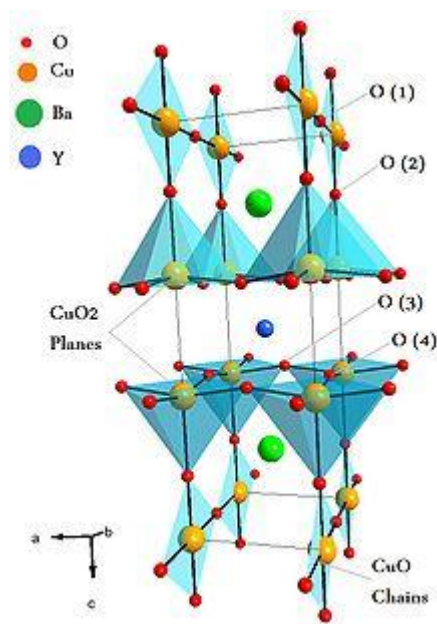


Figura 5.2 Estructura cristalina del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

Esta estructura cristalina es de tipo perovskita y es muy importante para las propiedades que ofrece, ya que se conoce que las corrientes en el estado superconductor viajan por las capas de CuO_2 , en dirección paralela al plano ab.

Dos de las **propiedades físicas** que más interesan para este proyecto son:

- **Temperatura crítica:** Su valor es de **92 K**, por encima de los 77 K del entorno criogénico refrigerado con nitrógeno líquido, por lo que no habría problemas por esta parte en alcanzar el estado superconductor.
- La **longitud de penetración λ** es de **170 nm**.

Como se ha descrito anteriormente, la fórmula química del compuesto es $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ donde la cantidad de oxígeno no es fija, sino que puede variar. Como es de esperar, dependiendo de la cantidad de oxígeno, el material tendrá un comportamiento u otro. En este caso es interesante ver cómo afecta a las propiedades superconductoras del propio material. Se sabe que la temperatura crítica se ve afectada dependiendo de la cantidad de oxígeno que contenga el compuesto, como se muestra en la figura 5.3.

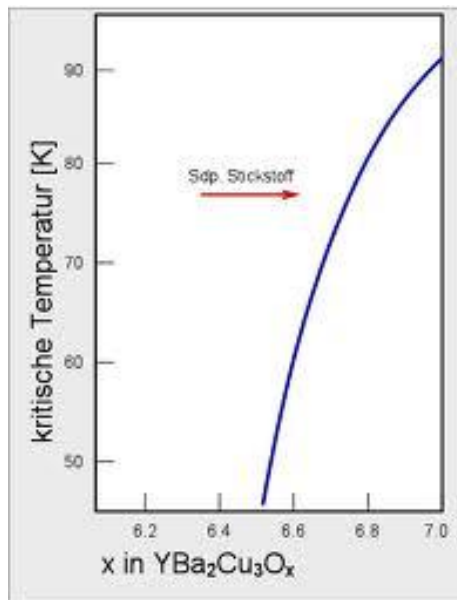


Figura 5.3 Temperatura crítica del YBaCuO dependiendo de la cantidad de oxígeno que presente

La **temperatura crítica** será **máxima** cuando la **cantidad x de oxígeno sea 7**. Cuanto menor sea esta cantidad de oxígeno, menor será la temperatura crítica del superconductor hasta poder llegar a una **temperatura crítica del cero absoluto** para un valor de **x de 6.5** aproximadamente (es una línea asintótica).

Una vez comprobada la temperatura crítica de este material, es importante asegurar el campo magnético crítico para un estado Meissner puro.

Aquí se va a comparar tanto el **YBaCuO completamente oxigenado** como el **YBaCuO con una carga de oxígeno de 6.64** para poder dar claridad a lo explicado anteriormente (ver figura 5.4). La temperatura crítica del YBaCuO completamente oxigenado es mayor y permite un mayor campo tangencial antes de sobrepasar el estado superconductor, mientras que estos límites para el YBaCuO con 6.64 de oxígeno son mucho menores [41].

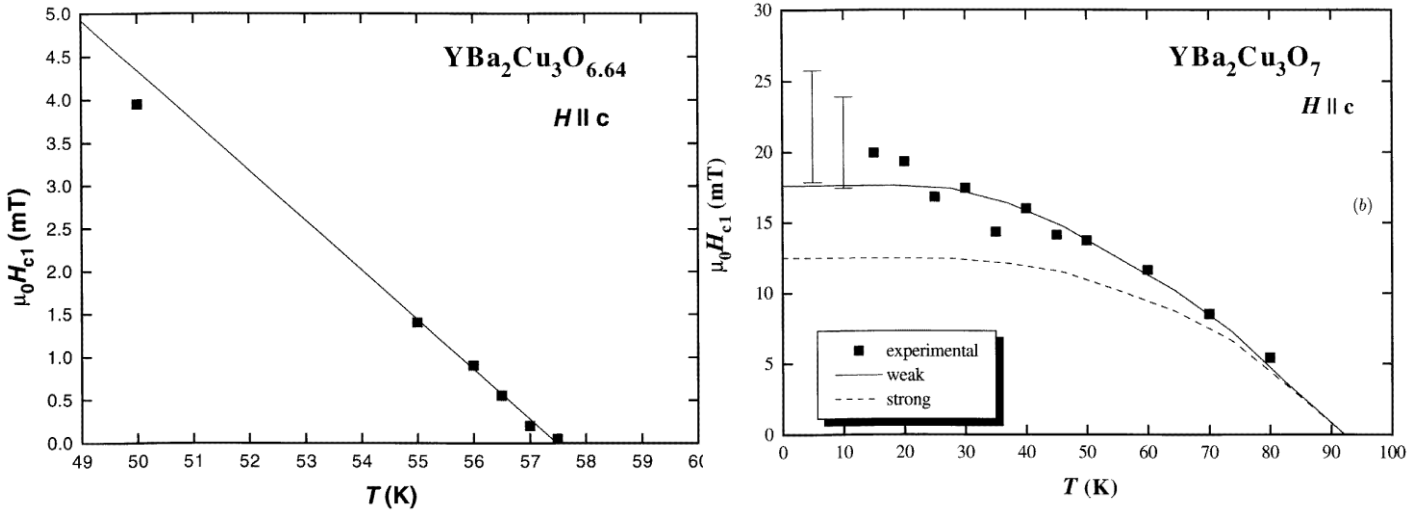


Figura 5.4 Campo magnético tangencial en función de la temperatura crítica para dos composiciones distintas de YBaCuO

Antes de analizar las gráficas es importante determinar el campo magnético tangencial que se obtiene para el mecanismo. En el caso donde se desarrollaría su funcionamiento normal ($X = 0$ mm, $Y = 0$ mm, $Z = 2.3$ mm), dicho campo es de 5888.33 A/m^2 . Este campo se puede relacionar con B mediante la permeabilidad magnética μ_0 , cuyo valor es $4\pi \cdot 10^{-7}$. De esta manera obtenemos un valor de **7.4 mT**.

Una vez se conoce el valor de campo que se tiene, y observando las gráficas en la figura 5.4, para obtener el estado Meissner se necesita una **temperatura de 80 K para el YBaCuO completamente oxigenado**. Para el otro **YBaCuO con 6.64 de oxígeno** se puede deducir que la temperatura debe ser **menor de 49 K**. De esta manera, la composición más práctica para utilizar en este mecanismo sería el YBaCuO completamente oxigenado ya que con nitrógeno líquido, por ejemplo, podría conseguirse la temperatura objetivo (la temperatura de fusión del nitrógeno es de 77 K).

Una vez visto lo anterior, se puede asegurar este material como superconductor para el mecanismo al estar lejos del límite de campo magnético. Además, como ya se ha comentado anteriormente, aunque no se va a entrar en más detalles, ofrece **buenas prestaciones** para este tipo de mecanismos y es **fácil encontrarlo en el mercado**.

5.3. Tl-2223

El **Tl-2223**, cuya fórmula química es $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$, es un material superconductor que, atendiendo a la clasificación estipulada en el capítulo 2, se puede clasificar de la siguiente manera:

- Según la temperatura crítica: Superconductor de **alta temperatura**.
- Según el comportamiento físico: Superconductor de **tipo II**.
- Según la teoría que lo explica: Superconductor **exótico**.

La estructura cristalina de este material se muestra en la figura 5.5.

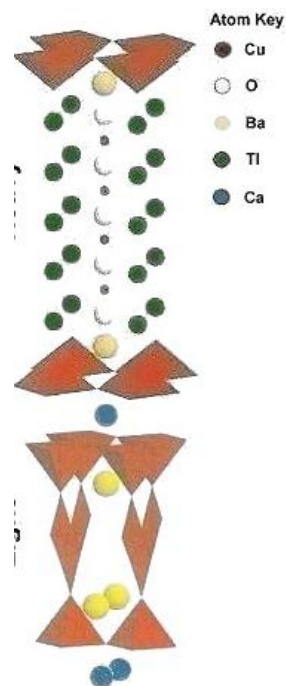


Figura 5.5 Estructura cristalina del $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$

Las características más importante respecto al YBaCuO con la que cuenta este material es su **temperatura de transición**, con un valor de **121 K**, más alta que el que el otro material y, por tanto, es más fácil aún conseguir su

estado superconductor. Sin embargo, el T1-2223 no presenta tan buenos resultados para poder aplicar en el mecanismo como se muestra en la figura 5.6 [41].

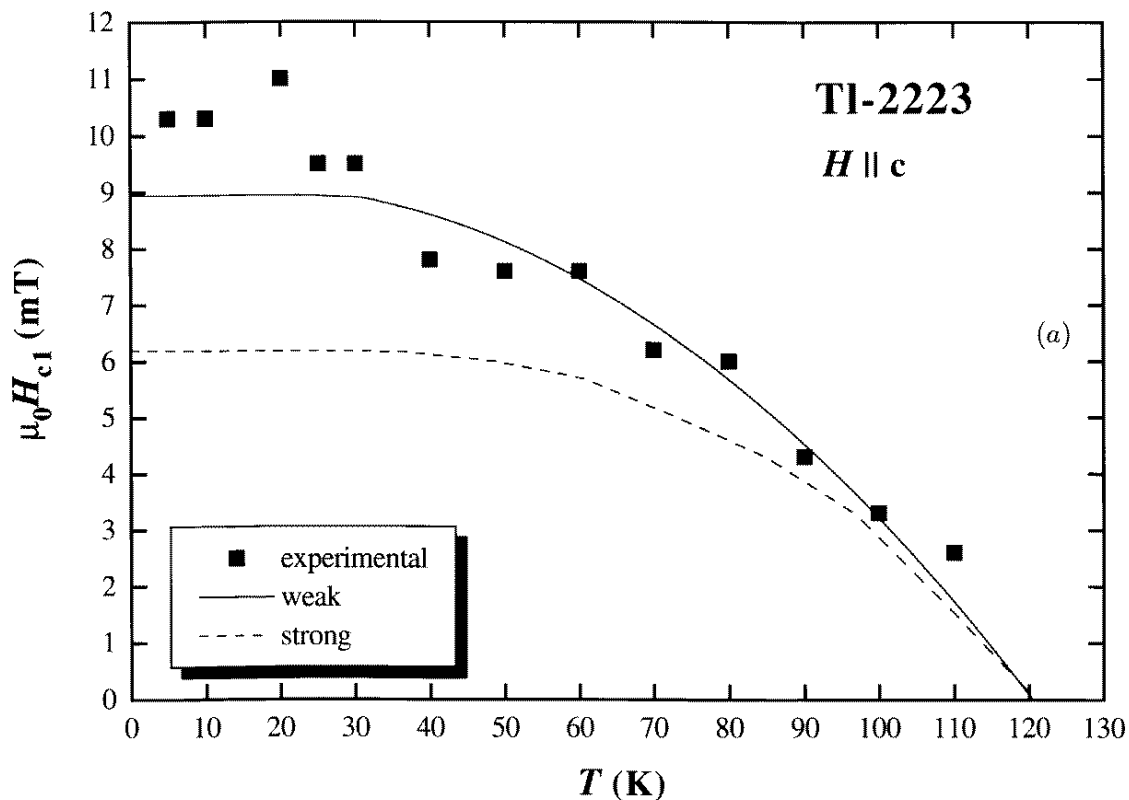


Figura 5.6 Campo magnético tangencial en función de la temperatura crítica para el T1-2223

Se observa cómo, en este caso, para un campo magnético de 7.4 mT, la **temperatura para poder conseguir un estado Meissner** debe ser alrededor de **50 K**. Esto es un problema ya que el nitrógeno líquido como refrigerante no vale como solución y ya habría que recurrir a soluciones mucho más caras y complicadas como el helio líquido, por ejemplo.

Por tanto, el T1-2223 no es mejor opción para el mecanismo que el YBaCuO al ser más complicado de conseguir el estado Meissner y, además, es más caro y complicado de encontrar en el mercado.

6. PRESUPUESTO

6.1. COSTE DE ADQUISICIÓN, MONTAJE Y PRUEBA

En este apartado se va a analizar el coste del proyecto en caso de llevar a cabo la producción de un prototipo. Para ello se incluye el coste de piezas, montaje del mecanismo y la prueba que sea necesaria realizar para obtener resultados experimentales.

6.1.1. Coste de adquisición

Para este mecanismo es necesario fundamentalmente un imán permanente con las dimensiones especificadas en el capítulo 3, así como un superconductor con la forma “U” requerida y criostato para experimentos de este tamaño. Además deben incluirse equipo de seguridad.

En la tabla 6.1. se incluyen los costes de adquisición de material.

MATERIALES				
Elemento	Cantidad	Empresa	Coste unitario [€]	Coste total [€]
Imán permanente cilíndrico NdFeB 40 Dim: Φ 4mm X 24 mm	1	HKCM	2,94	2,94
Pieza superconductor YBaCuO Dim: Re = 23mm Ri = 16.5 mm L = 300 mm	1	CAN Superconductors	3750,00	3750,00
Criostato con bomba inyectora y suministro de N ₂ líquido	1	ARS	40000,00	40000,00
			TOTAL MATERIALES [€]	43752,94

Tabla 6.1 Coste de materiales empleados en el proyecto

En la tabla 6.2. se incluyen los gastos de equipo de seguridad para el laboratorio.

EQUIPO DE SEGURIDAD				
<i>Elemento</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Empresa</i>	<i>Coste unitario [€]</i>	<i>Coste total [€]</i>
Bata para laboratorio	1	Frade	9,00	9,00
Gafas de protección	1	Frade	15,00	15,00
Guantes con aislamiento para entornos criogénicos	1	Frade	45,00	45,00
Pinzas de material plástico termoestable	2	SPI Supplies	1,50	3,00
			TOTAL EQUIPO [€]	72,00

Tabla 6.2 Coste de equipo de seguridad necesario para trabajar en el laboratorio

6.1.2. Coste de montaje y pruebas

En este apartado se calcula un presupuesto para el tiempo total empleado en el montaje del mecanismo completo así como el tiempo total para la realización de los ensayos. En la tabla 6.3 se incluyen dichos gastos.

PERSONAL			
<i>Elemento</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Coste unitario [€/h]</i>	<i>Coste total [€]</i>
Investigador	40	35,00	1400,00
Ayudante de laboratorio	20	25,00	500,00
		TOTAL PERSONAL [€]	1900,00

Tabla 6.3 Coste total de personal responsable de la ejecución del proyecto

6.1.3. Coste total

El coste total estimado del proyecto asciende a **45724,94 €**.

No incluye IVA.

6.2. COSTE DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO

6.2.1. Coste del conjunto de equipo necesario

En este apartado se incluye el coste elaboración del presente proyecto incluyendo equipo informático, licencias de software utilizadas, personal para la ejecución de análisis y toma de datos y fungibles.

En la tabla 6.4 se incluyen los gastos informáticos.

EQUIPO INFORMÁTICO				
Elemento	Cantidad	Empresa	Coste unitario [€]	Coste total [€]
Ordenador sobremesa: Intel® Core I7, 3.3 GHz, 16 GB Ram, 64-bit OS, Windows 7 Ultimate Edition	1	PCS	950,00	950,00

Tabla 6.4 Coste del equipo informático utilizado en el proyecto

En la tabla 6.5 están incluidos los gastos de licencia del software utilizado.

LICENCIAS DE SOFTWARE				
Elemento	Cantidad	Empresa	Coste unitario [€]	Coste total [€]
Ansys Maxwell v15 [*]	40 días	ANSYS	37,66	1506,28
PLM Solid Edge ST ^{*2}	2 días	Siemens	22,17	44,35
Office 2010 Home Edition ^{*3}	40 días	Microsoft	-	-
			TOTAL SOFTWARE [€]	1550.63

Tabla 6.5 Coste de licencias de software utilizado

En cuanto al coste de personal necesario para el análisis de resultados, será suficiente con un becario de investigación con conocimientos Ansys

Maxwell v15. Sabiendo que el coste por hora es de 7.5 €, el coste total para la elaboración del proyecto en 40 horas es de 300 €.

Se añade un coste de servicios y fungibles de 250 €.

6.2.2. Coste total

El coste total estimado asciende a **3050.63 €**.

No incluye IVA.

^{*} Coste unitario calculado para 239 días laborables. Coste de la licencia total: 9000 €.

^{*2} Coste unitario calculado para 239 días laborables. Coste de la licencia total: 5300 €.

^{*3} La licencia está incluida en el precio del ordenador de sobremesa.

7. CONCLUSIONES

7.1. CONCLUSIONES

Se ha diseñado y analizado numéricamente un **cojinete lineal magnético pasivo no histerético para entornos criogénicos**. La forma en “U” del superconductor y el dipolo magnético seleccionado proporcionan un punto de levitación estable. Se han desarrollado dos mecanismos cuya geometría es muy similar pero con un redondeo de los bordes rectos en el mecanismo mejorado que aumenta las prestaciones del mecanismo completo. La fuerza restauradora para una desviación lateral se ha calculado con resultados satisfactorios al mantener al imán permanente en su posición de equilibrio.

Se ha calculado el campo magnético máximo en la posición de equilibrio e inicial, así como para su posible desviación y desplazamiento a lo largo del eje X. Dicho campo se ha comparado con el valor crítico de campo magnético para diferentes materiales superconductores demostrando la viabilidad de un cojinete lineal magnético pasivo sin histéresis en el movimiento.

En cuanto a **aplicaciones interesantes** que podría tener este mecanismo está el **posicionamiento preciso**. La superficie frontal del imán permanente es de 12.56 mm², suficiente para un rayo láser que efectúa tales medidas para ese posicionamiento. Esto hace de este sistema una configuración muy atractiva para nano y microposicionadores.

La **simetría traslacional alta** del campo magnético visto por el superconductor asegura una **carrera larga** de alrededor de ± 100 mm con un rendimiento completo. La principal ventaja de este sistema es que la longitud de carrera se puede extender tanto como se necesite con la misma sección del superconductor y el mismo imán permanente. Cuanto más largo es el superconductor, más pequeños son los porcentajes del efecto borde.

Una vez que se ha finalizado el desarrollo de este proyecto, se considera que los objetivos por los cuales se comenzó han sido cumplidos.

7.2. CONCLUSIONS

A **non-hysteretical magnetic passive linear bearing for cryogenic environments** has been designed and analyzed. The “U-shaped” superconductor and the magnetic dipole provide a stable levitation point. Two mechanisms with a very similar geometry have been performed. The difference is that the border of the improved mechanism has been rounded off in order to improve its performance. The restoring force for a lateral run out has been calculated with satisfying results since it helps the permanent magnet to recover its equilibrium position.

The tangential magnetic field has been calculated for the initial position, lateral run out and displacement along the X axis. This field has been compared with the critical magnetic field of various superconducting materials proving the feasibility of a magnetic passive linear bearing without hysteresis in its movement.

Regarding some **interesting applications** that this mechanism could have, **precise positioning** is a good choice. The front surface of the permanent magnet is 12.56 mm^2 , which is enough for a laser beam like those used in precision positioning measurements. This makes this mechanism very attractive for micro and nanopositioners.

The **high translational symmetry** of the magnetic field seen by the superconductor assures a **usable long stroke** of around $\pm 100 \text{ mm}$ with full performance. The main advantage of the system is that the usable long stroke can be extended as long as required with the same cross-section of the superconductor and the same magnet. The larger the superconducting guide is, the smaller in stroke percentage the border effects are.

Once the development of this project has been finalized, it is considered that the goals for which it was started have been accomplished.

8. REFERENCIAS

REFERENCIAS*

- [1] M.Tinkham and G.McKay. "Introduction to superconductivity". Ed. McGraw Hill 1996, 2nd edition.
- [2] <http://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-and-technology/engineering/superconductivity/content-section-2.3>
- [3] Díez Jiménez, Efrén. "Fundamentos de ingeniería de mecanismos compuestos por imanes y superconductores en estado Meissner." Pérez Díaz, José Luis. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2012 [Biblioteca Rey Pastor, Universidad Carlos III de Madrid].
- [4] <http://www.o-keating.com/hsr/maglev.htm> [2010].
- [5] http://six_dot.tripod.com/ciencias/gpb.html [2010].
- [6] http://electronicosonline.com/noticias/notas.php?id=A2823_0_1_0_M [2010].
- [7] ESA/SRE (2009)6, "SPICA: Revealing the origins of planets and galaxies," 2009.
- [8] ESA, "European non-dependence on critical space technologies: EC-ESA-EDA list of urgent actions for 2009." 2009.
- [9] Y. L. Ostrovskaya, T. Yukhno, G. Gamulya, Y. V. Vvedenskij, and V. Kuleba, "Low temperature tribology at the B. Verkin Institute for Low Temperature Physics & Engineering (historical review)," Tribology international, vol. 34, no. 4, pp. 265–276, Apr. 2001.
- [10] Y. L. Ostrovskaya, T. Yukhno, G. Gamulya, Y. V. Vvedenskij, and V. Kuleba, "Low temperature tribology at the B. Verkin Institute for Low Temperature Physics & Engineering (historical review)," Tribology international, vol. 34, no. 4, pp. 265–276, Apr. 2001.

- [11] A. Trautmann, C. R. Siviour, S. M. Walley, and J. E. Field, "Lubrication of polycarbonate at cryogenic temperatures in the split Hopkinson pressure bar," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 31, no. 5, pp. 523–544, May 2005.
- [12] G. Theiler, T. Gradt, and P. Klein, "Friction and wear of PTFE composites at cryogenic temperatures," *Tribology international*, vol. 35, pp. 449–458, 2002.
- [13] N. Fleischer, M. Genut, L. Rapoport, and R. Tenne, "New nanotechnology solid lubricants for superior dry lubrication," in *Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, 2003, pp. 65 – 66
- [14] R. Bassani, "Levitation of passive magnetic bearings and systems," *Tribology International*, vol. 39, no. 9, pp. 963–970, Sep. 2006.
- [15] R. Bassani and S. Villani, "Passive magnetic bearings: the conic-shaped bearing," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 213, no. 2, pp. 151–161, Jan. 1999.
- [16] Q. Tan, W. Li, and B. Liu, "Investigations on a permanent magnetic–hydrodynamic hybrid journal bearing," *Tribology International*, vol. 35, no. 7, pp. 443–448, Jul. 2002.
- [17] D. Kim and S. Park, "Hydrostatic air foil bearings: Analytical and experimental investigation," *Tribology International*, vol. 42, no. 3, pp. 413–425, Mar. 2009.
- [18] Y. M. Choi and D. G. Gweon, "A high-precision dual-servo stage using halbach linear active magnetic bearings," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, no. 99, pp. 1–7, 2011.
- [19] S. A. J. Hol, E. Lomonova, and A. J. A. Vandenput, "Design of a magnetic gravity compensation system," *Precision Engineering*, vol. 30, pp. 265–273, 2006.

- [20] T. C. Van Den Dool, F. Kamphues, W. L. M. Gielesen, and B. C. Braam, "Magnetic Bearing based cryo-mechanisms for future IR missions," in *astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, 2009, vol. 2010, no. 0, p. 33.
- [21] L. Püst, "Weak and strong nonlinearities in magnetic bearings," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 39, no. 7, pp. 779–795, Jul. 2004.
- [22] T. Harris and L. Widbro, "Magnetic Bearings," *Evolution of SKF*, vol. 03, no. 2, pp. 24–28, 2003.
- [23] R. Bassani, "Dynamic stability of passive magnetic bearings," *Nonlinear Dynamics*, vol. 50, no. 1–2, pp. 161–168, Dec. 2006.
- [24] V. Arkadiev, "A Floating Magnet," *Nature*, vol. 160, no. 4062, pp. 330–330, Sep. 1947.
- [25] J. R. Hull, "Superconducting bearings," *Superconductor Science and Technology*, vol. 13, no. 2, pp. R1–R15, Jul. 2000.
- [26] T. Iizuka and H. Fujita, "Precise positioning of a micro conveyor based on superconducting magnetic levitation," in *Micromechatronics and Human Science*, 1997. Proceedings of the 1997 International Symposium on, 1997, pp. 131–135.
- [27] T. Iizuka, N. Sakai, and H. Fujita, "Position feedback control using magneto impedance sensors on conveyor with superconducting magnetic levitation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 150, no. 1, pp. 110–115, Mar. 2009.
- [28] J. Serrano-Tellez, F. Romera-Juarez, D. González-de-María, M. Lamensans, H. Argelaguet-Vilaseca, J.-L. Pérez-Díaz, J. Sánchez-Casarrubios, E. Díez-Jiménez, and I. Valiente-Blanco, "Experience on a cryogenic linear mechanism based on superconducting levitation," in *Conference on Modern Technologies in Space-and Ground-Based Telescopes and Instrumentation II*, 2012, p. 84501Y–84501Y–9.

- [29] J. Pérez-Díaz, “Non-contact linear slider for cryogenic environment,” ... and Machine Theory, vol. 49, pp. 308–3014, 2012.
- [30] J. L. Perez-Diaz, I. Valiente-Blanco, E. Diez-Jimenez, and J. Sanchez-Garcia-Casarrubios, “Superconducting Noncontact Device for Precision Positioning,” IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, 2013.
- [31] E. Diez-Jimenez and J. L. Perez-Diaz, “Foundations of Meissner Superconductor Magnet Mechanisms Engineering,” in Superconductivity - Theory and Applications, 2011, pp. 153–172.
- [32] Diez-Jimenez, E., Perez-Diaz, J.-L., & Garcia-Prada, J. C. (2011). Local model for magnet–superconductor mechanical interaction: Experimental verification. Journal of Applied Physics, 109(6), 063901. doi:10.1063/1.3553581
- [33] E. Diez-Jimenez and B. Sander, “Tailoring of the flip effect in the orientation of a magnet levitating over a superconducting torus: Geometrical dependencies,” ... C: Superconductivity, vol. 471, no. 7–8, pp. 229–232, 2011.
- [34] Valiente-Blanco, I., Diez-Jimenez, E., & Perez-Diaz, J.-L. (2011). Alignment effect between a magnet over a superconductor cylinder in the Meissner state. Journal of Applied Physics, 109(7), 07E704. doi:10.1063/1.3535548
- [35] E. Diez-Jimenez and J. Perez-Diaz, “Flip effect in the orientation of a magnet levitating over a superconducting torus in the Meissner state,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 471, no. 1–2, pp. 8–11, 2011.
- [36] J. L. Perez-Diaz, E. Diez-Jimenez, I. Valiente-Blanco, and J. Herrero-de-Vicente, “Stable thrust on a finite-sized magnet above a Meissner superconducting torus,” *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 6, p. 063907, 2013.

- [37] E. Díez-Jimenez, I. Valiente-Blanco, and J. . Perez-Díaz, “Superconducting Sphere and Finite-Size Permanent Magnet: Force, Torque, and Alignment Effect Calculation,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 26, no. 1, pp. 71–75, Jul. 2012.
- [38] www.ansys.com
- [39] Da Costa Branco, P. J., & Dente, J. a. (2012). Design and Experiment of a New Maglev Design Using Zero-Field-Cooled YBCO Superconductors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(11), 4120–4127. doi:10.1109/TIE.2011.2174541
- [40] Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Riedel, T., Goebel, B., Wippich, D., & Schirrmeister, P. (2012). Superconductor bearings, flywheels and transportation. *Superconductor Science and Technology*, 25(1), 014007. doi:10.1088/0953-2048/25/1/014007
- [41] Böhmer, C., Brandstätter, G., & Weber, H. W. (1997). The lower critical field of high-temperature superconductors. *Superconductor Science and Technology*, 10(7A), A1–A10. doi:10.1088/0953-2048/10/7A/002

**Las referencias están numeradas por orden de aparición en el texto.*

ANEXOS

ANEXO A. CÁLCULO DEL CAMPO MAGNÉTICO TANGENCIAL USANDO ANSYS MAXWELL v15

El campo magnético tangencial es muy útil a la hora de poder determinar en qué parte del superconductor se consigue el máximo y, de esta manera, poder asegurar un estado Meissner puro.

Ansyes Maxwell v15 tiene predeterminado el cálculo de la densidad de flujo magnético B así como la intensidad del campo magnético H, entre otros. Como se ve en el capítulo 4, el campo magnético tangencial que sufre un superconductor es:

$$\vec{H}^{tang} = \vec{n}_s \times \vec{H}^{ap}$$

Donde sus variables se especifican en dicho capítulo.

Por tanto, esa expresión es la que debemos introducir en el software utilizando la herramienta “Calculator” que se encuentra dentro de “Fields”. En la figura AA.1 se muestra donde se encuentra dicha herramienta.

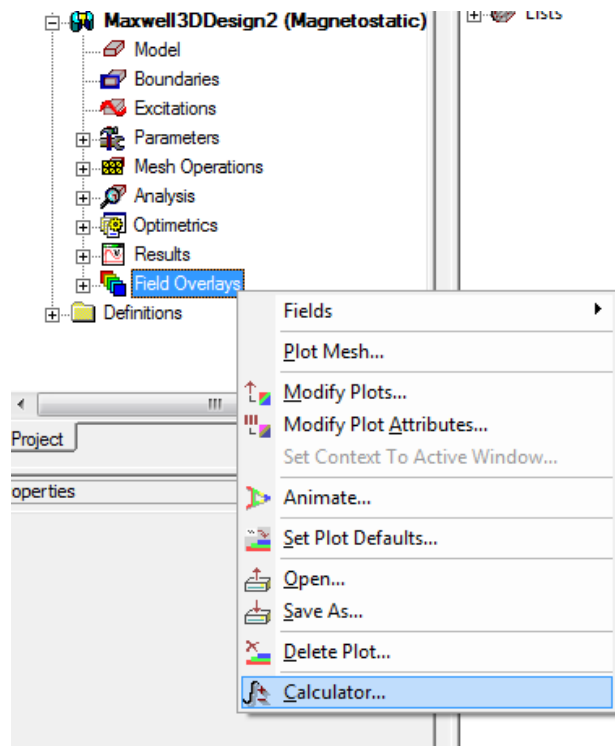


Figura AA.1 Localización de “Calculator”

Una vez en la ventana de “Calculator” (Figura AA.2), se ve que se puede dividir en cuatro zonas diferentes. En la zona A aparecen las soluciones que calcula por defecto Maxwell cuando se realiza una simulación. Entre ellas está, por ejemplo, “H_Vector”, que es la solución vectorial de la intensidad de campo magnético. Esta variable se utilizará para calcular el campo magnético tangencial. Todas las soluciones que se vayan obteniendo irán apareciendo en esta ventana. También aparecen las opciones de “Copy to stack”, que se utiliza para insertar una de las soluciones en el campo de cálculo B. La opción “Add” permite añadir una solución de las que ya han sido obtenidas. Además también aparece una fila “Library”, donde Maxwell permite guardar las expresiones de las variables que se han calculado y cargarlas cuando sea necesario.

La zona B es el campo de cálculo. Los operandos que se pueden introducir son: números o vectores de valores puntuales, variables, parámetros, elementos geométricos, campos vectoriales y campos escalares. Las opciones que aparecen justo debajo de este campo de cálculo se usan para cambiar el orden de los operandos en dicho campo.

En la zona C se pueden introducir otros tipos de elementos al campo de cálculo aparte de soluciones derivadas. Gracias a esta zona se pueden conseguir transformar valores escalares en vectoriales, asignar funciones, etc.

La zona D cuenta con los operadores matemáticos que se pueden aplicar a las variables del campo de cálculo. Se dividen en cuatro columnas distintas dependiendo del tipo de operando al que se aplique: escalar, vectorial, etc.

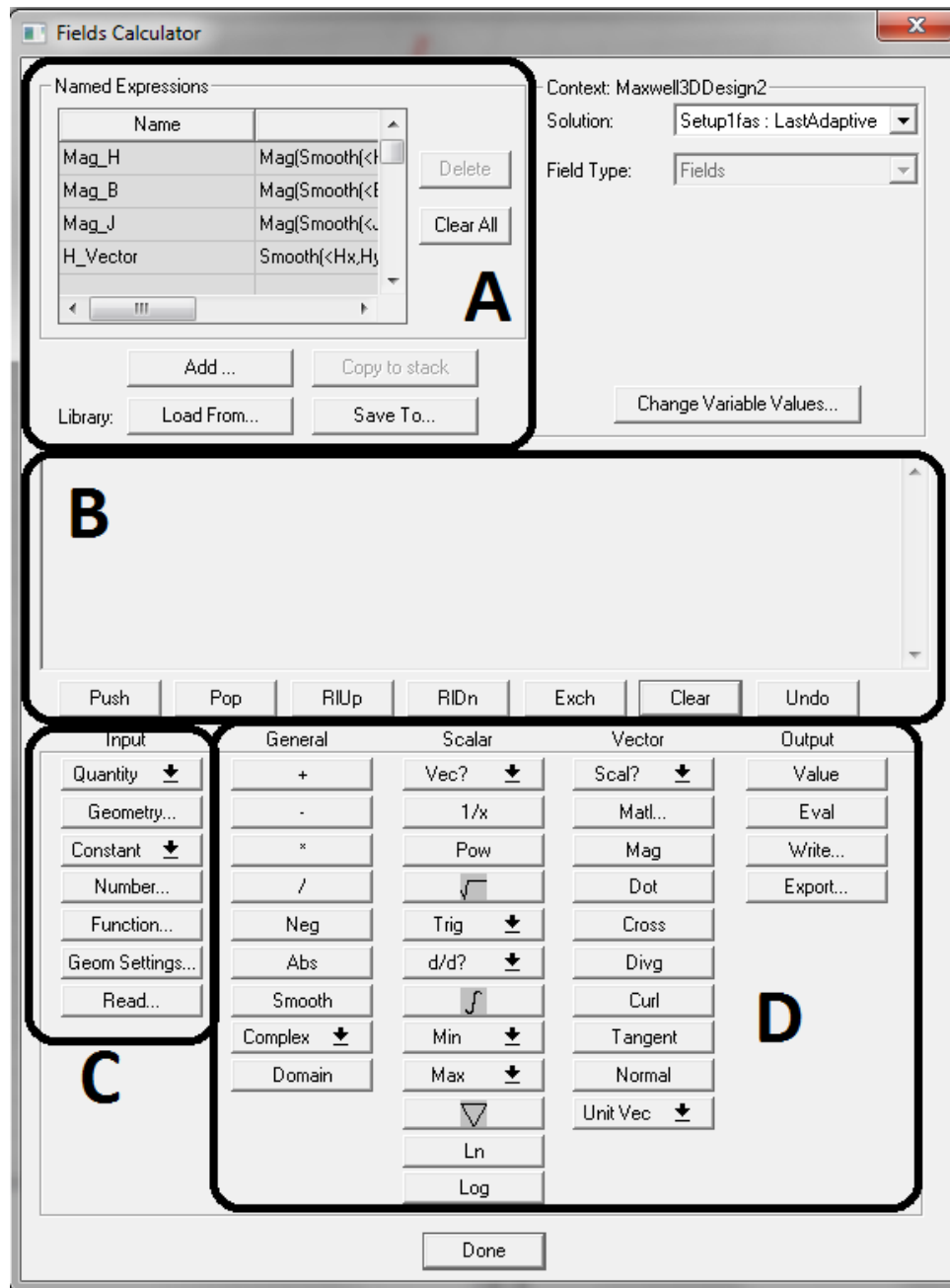


Figura AA.2 Ventana de diálogo de “Calculator”

Una vez conocida la interfaz que se va a utilizar, se pasa a describir el proceso para el cálculo del campo magnético tangencial.

Los pasos a seguir para conseguir esta expresión son los siguientes:

- Se inserta la geometría del superconductor para poder calcular el campo vectorial de sus componentes normales:

- *Input (C) – Geometry – Surface* – Nombre de la superficie que se ha asignado previamente al superconductor (HTS en este proyecto)
- *Vector (D) – Unit Vec – Normal*
- Se calcula el producto vectorial:
 - Seleccionar *H_Vector (A) – Copy to stack*
 - *Vector (D) – Cross*

En el campo de cálculo debe aparecer los siguiente:

Vec: (Cross(SurfaceNormal, H_Vector)

Ahora se utiliza “Add” para añadir la variable obtenida con un nombre que se pueda identificar. En este proyecto se ha nombrado como “CampoTang”. Ahora debe aparecer dicha solución en la zona A.

Con esta nueva variable se consigue la densidad de corriente de manera vectorial. Sin embargo, es más interesante obtener esta solución como un valor en magnitud. Para ello sólo es necesario realizar lo siguiente en “Calculator”:

- Seleccionar *CampoTang (A) – Copy to stack*
- *Vector (D) – Mag*

Una vez hecho esto se obtiene otra solución en el campo de solución que se puede guardar con la opción “Add” con el nombre MagCampoTang, por ejemplo.

Para poder saber el valor máximo de dicho campo para cada posición del imán permanente, es necesario obtener tal expresión. Para ello se procede de la siguiente manera:

- Seleccionar *MagCampoTang (A) – Copy to stack*
- *Input (C) – Geometry – Surface* – Nombre de la superficie que se ha asignado previamente al superconductor (HTS en este proyecto)
- *Scalar (D) – Max – Value*

Esta nueva solución se puede guardar como “MaxCampoTang”. Ésta será la solución que se utilizará para poder calcular los valores máximos del campo magnético tangencial durante todo el proyecto.

Una vez que ya se tienen en la librería dichas expresiones, no es necesario especificar el cálculo de ellos. Maxwell calculará automáticamente todas las expresiones que se encuentren en la zona A de “Calculator”. Cuando ya se ha realizado el cálculo, bastará con seleccionar en la solución “Named Expressions” y elegir, en la ventana que aparece, aquellas que sean necesarias.

Para visualizar el campo sobre el superconductor, sólo es necesario ir a “Fields” y “Named Expressions”. Previamente se ha debido selección la superficie donde interesa ver el campo, y nunca el superconductor entero como tal, ya que la expresión del campo magnético tangencial está calculada para superficies y no volúmenes.

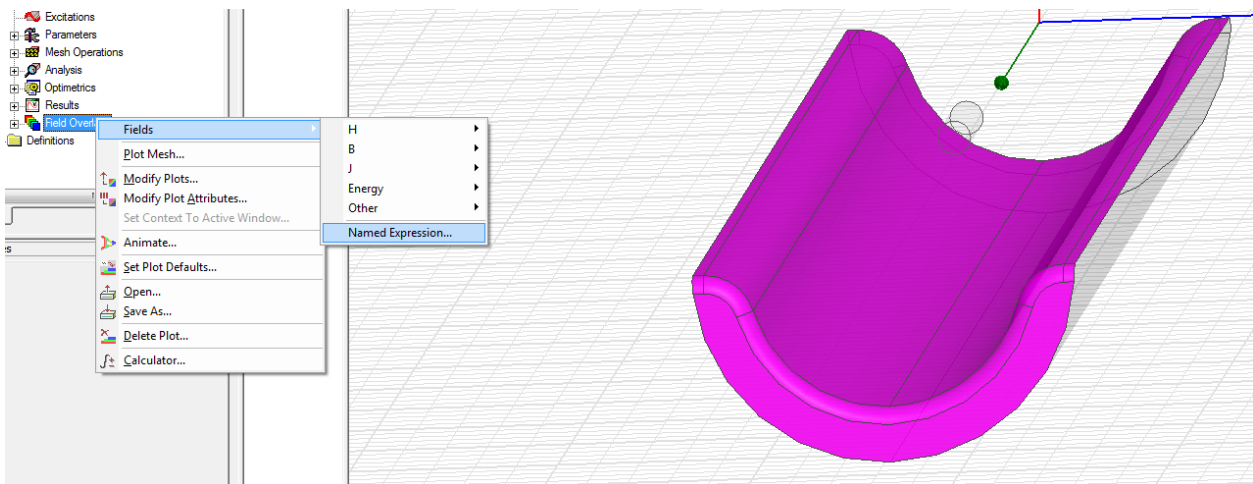


Figura AA.3 Representación de las expresiones obtenidas con “Calculator”